

基于 MSSA 算法的西北地区 GNSS 坐标 时间序列共模误差分析*

梁 斌¹ 于明雪²

1(中国地震局第一监测中心 天津 300000)

2(兰州交通大学测绘与地理信息学院 兰州 730000)

摘 要 针对西北地区新疆、甘肃、青海全球导航卫星系统 (GNSS) 垂向坐标时间序列的共模误差分析研究不够全面、深入这一问题, 以 MSSA 算法为理论基础, 对新疆、甘肃、青海 61 个站点进行数据预处理以提高数据的精度与完整性, 在此基础上提取分析该区域 GNSS 坐标时间序列中的共模误差, 并进行周期性探测分析, 将提取的共模误差 (CME) 与水文荷载 (NTOL)、非潮汐大气荷载 (NTAL) 以及非潮汐海洋荷载 (HYDL) 引起的位移时间序列进行相关性分析以探究共模误差的特征性来源. 对比站点共模误差剔除前后序列, 结果表明残差标准差平均精度提高 27.5%, 测站减少幅度最大达到 66.7%, 精度提高效果显著; 分析结果得到该区域共模误差受到三种地表质量荷载影响显著程度从高到低分别为水文荷载、非潮汐大气荷载、非潮汐海洋荷载. 通过对共模误差的提取分析以及误差特征来源研究可以进一步提高西北地区 GNSS 坐标时间序列精度, 以更好地为地震位移、地壳形变研究提供更高精度数据支持.

关键词 西北地区, 共模误差, GNSS, 周期性探测

中图分类号 P258

Common Mode Error Analysis of GNSS Coordinate Time Series in Northwest China Based on MSSA Algorithm

LIANG Bin¹ YU Mingxue²

1(The First Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300000)

2(College of Surveying and Geographic Information, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000)

Abstract Aiming at the problem that the common mode error analysis of the vertical coordinate time series of the Global Navigation Satellite System (GNSS) in Northwest China is not comprehensive and in-depth, the MSSA algorithm is used as the theoretical basis to preprocess the data of 61 stations in the

* 中国地震局第一监测中心科技主任基金项目资助 (FMC202307)

2024-05-29 收到原稿, 2024-11-01 收到修定稿

three northwestern provinces (Xinjiang, Gansu, Qinghai) to improve the accuracy and integrity of the data, and on this basis, the common mode error of GNSS coordinate time series in the region is extracted and analyzed. The characteristic source of the Common Mode Error (CME) was investigated by correlation analysis between the extracted CME and the displacement time series caused by Hydrologic Load (HYDL), Non-Tidal Atmospheric Load (NTAL) and Non-Tidal Ocean Load (NTOL). Compared with the sequence before and after the removal of the common mode error, the average accuracy of the residual standard deviation is increased by 27.5%, and the maximum reduction of the station is reduced by 66.7%. The results show that the common mode error in this region is significantly affected by three kinds of surface mass loads: hydrologic load, non-tidal atmospheric load and non-tidal ocean load. Through the extraction and analysis of common mode errors and the research on the source of error characteristics, the GNSS coordinate time series accuracy of the three northwestern provinces can be further improved, so as to provide higher precision data support for seismic displacement and crustal deformation research.

Key words Northwest China, Common mode error, GNSS, Periodic detection

0 引言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的区域连续站观测数据是开展区域地壳形变和地震预报研究最有效的数据支撑, 在地震位移、全球板块运动研究以及地震预报研究等领域发挥了至关重要的作用. 然而, 在观测、解算过程中 GNSS 定位精度受到众多因素的制约, 海潮固体潮、地下水以及气候环境和地壳运动等众多因素对 GNSS 坐标时间序列产生的影响统称为共模误差 (Common-Mode Error, CME)^[1-3]. 共模误差的分析和特性研究对 GNSS 坐标时间序列精度提高以及地壳运动信息的精确获取具有重要的作用.

近年来, 有关共模误差的相关研究不断深入. 早在 2010 年有研究分析 GNSS 观测资料发现了噪声多样性, 进而提出带权均值法、主成分分析等算法进行 GNSS 坐标时间序列滤波处理^[4-6]. Xie 等^[7,8] 分析了 GPS 站点在大尺度下的相关性, 引入相关系数作为权重因子, 改进了区域叠加滤波算法. Tian 等^[9] 开展了功率谱分析、最大似然估计、区域叠加滤波、主成分变换以及质量荷载下的地壳弹性形变模拟等方法对比研究, 并讨论了各种方法在分析噪声的类型和强度、共模误差的物理起源等方面的作用及局限性. Tian 等^[10] 对川滇地区共模误差的潜在形成因素进行了研究, 揭示了共模误差的时间行为并不是完全随机的, 其包含了季节性、质量荷载等未建模信号.

西北地区 (本文指新疆、甘肃、青海) 位于南北地震带, 该区域是中国大陆地震活动最为频繁、复杂的地区之一, 精确分析该地区 GNSS 坐标时间序列共模误差可以为地震位移、板块运动、地震预报等研究提供有效的数据支撑. 本文对西北地区 GNSS 坐标时间序列共模误差提取分析以及特性开展深入研究, 针对新疆、甘肃、青海 61 个连续站近 10 年的 GNSS 坐标时间序列进行分析研究, 对原始数据进行预处理后通过多通道奇异谱分析算法 (MSSA) 对共模误差进行提取、剔除, 将提取的共模误差进行周期性探测分析与水文荷载、非潮汐大气荷载以及非潮汐海洋荷载引起的位移时间序列进行相关性分析, 探究共模误差的特征来源.

1 数据处理

1.1 坐标时间序列数据

选取由中国地震局第一监测中心定期解算得到的 ITRF14 框架下的西北地区 61 个陆态网连续站 (见图 1) 的原始坐标时间序列数据, 在 ITRF14 框架下, 使用加米特 (GAMIT)/格洛布克 (GLOBK) 软件解算^[11-14], 得到新疆、甘肃、青海 61 个陆态网络连续站近 10 年的 GNSS 坐标时间序列, 具体解算流程参见文献 [15].

1.2 数据预处理方法

由于接收机、天线维护以及未知外在因素产生

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{i+1}^1 & \cdots & x_{N-M+1}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M^1 & x_{M+1}^1 & \cdots & x_{M+i}^1 & \cdots & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{i+1}^2 & \cdots & x_{N-M+1}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M^2 & x_{M+1}^2 & \cdots & x_{M+i}^2 & \cdots & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^l & x_2^l & \cdots & x_{i+1}^l & \cdots & x_{N-M+1}^l \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M^l & x_{M+1}^l & \cdots & x_{M+i}^l & \cdots & x_N^l \end{bmatrix}. \quad (5)$$

每个时间序列的时滞矩阵的维度为 $L \times M$, 其中 $L=N-M+1$. MSSA 的展开分量形式为

$$X_{li+j} = \sum_i^{k+1} a_i^k E_{lj}^k. \quad (6)$$

式中, M 为窗口长度, E_{lj}^k 为特征向量 $\mathbf{E}^k$ 第 k 个特征向量在通道 l 时间滞后的 j 的分量 ($\mathbf{E}^k$ 称为时间-空间 EOF).

重构是利用计算的主成分与经验正交函数进行

计算重构, 重构成分是从被分析的对象中提取与某个或者某部分特征成分相关联的部分.

3 实验结果与分析

3.1 共模误差影响

由于共模误差在 U 方向最为明显, N, E 方向比较微弱, 因此本文仅选取 U 方向共模误差进行分析研究. 通过对 GNSS 坐标序列进行剔除处理, 从图 3 可以看出共模误差剔除后 GNSS 坐标时间序列振幅变化明显减小, 可以更加真实反映 GNSS 坐标时间序列变化情况. 采用对比 GNSS 坐标时间序列共模误差提取前后的标准差变化情况量化共模误差对时间序列的影响, 全部 61 个站点振幅统计结果见表 1.

由表 1 可得剔除共模误差后 GNSS 坐标时间序列精度得到明显提高, 序列的振动幅度明显减小, 通过多通道奇异谱分析进行共模误差剔除提高了坐标时间序列的精度并明显改善坐标序列的不确定性.

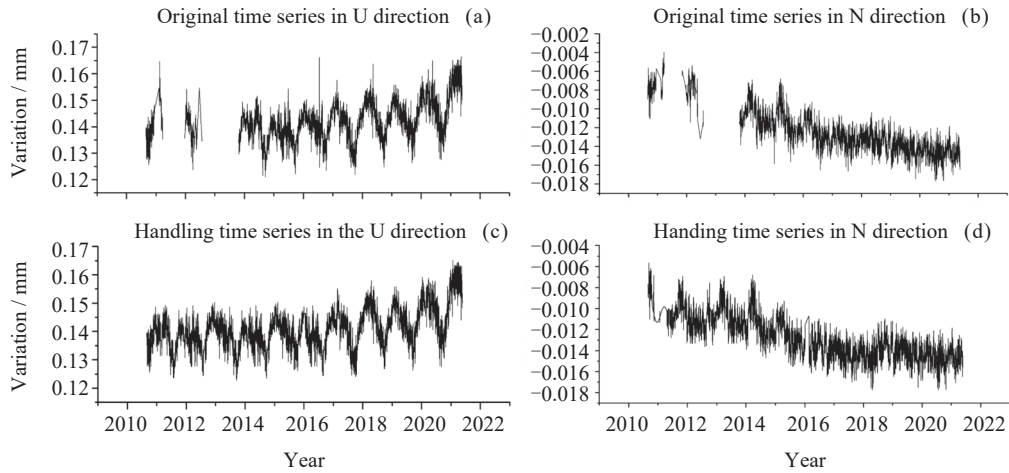


图 2 预处理前后对比分析

Fig. 2 Comparative analysis before and after pretreatment

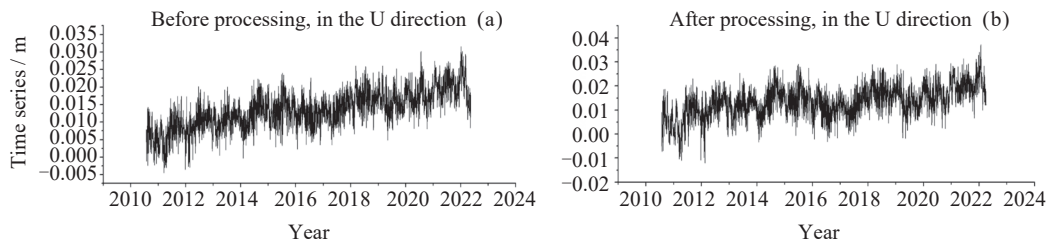


图 3 共模误差剔除前后对比

Fig. 3 Comparison before and after common-mode error removal

表 1 共模误差剔除前后振幅对比 (单位: m)
Table 1 Amplitude comparison before and after common-mode error removal (Unit: m)

测站	状态	最大值	最小值	平均值	标准差	测站	状态	最大值	最小值	平均值	标准差
GSAX	改正前	0.008	-0.022	-0.007	0.015	QHTT	改正前	0.029	-0.004	0.012	0.016
	改正后	0.005	-0.016	-0.003	0.011		改正后	0.011	-0.004	0.005	0.007
GSDH	改正前	0.013	-0.017	-0.003	0.015	QHYS	改正前	0.017	-0.012	0.006	0.019
	改正后	0.011	-0.014	-0.002	0.009		改正后	0.009	-0.005	0.003	0.007
GSDX	改正前	0.021	-0.025	0.002	0.023	XJAL	改正前	0.077	-0.021	0.021	0.049
	改正后	0.016	-0.017	-0.001	0.019		改正后	0.021	-0.013	0.011	0.021
GSDL	改正前	0.006	-0.007	0.001	0.003	XJBC	改正前	0.022	-0.028	-0.008	0.021
	改正后	0.005	-0.007	0.001	0.002		改正后	0.013	-0.011	-0.004	0.013
GSDT	改正前	0.005	-0.008	0.008	0.007	XJBE	改正前	0.023	-0.011	0.005	0.018
	改正后	0.003	-0.005	0.006	0.005		改正后	0.011	-0.007	0.003	0.006
GSJN	改正前	0.035	-0.029	0.008	0.032	XJBY	改正前	0.036	-0.009	0.012	0.024
	改正后	0.021	-0.017	0.005	0.015		改正后	0.015	-0.005	0.007	0.015
GSJT	改正前	0.029	-0.021	0.006	0.024	XJDS	改正前	0.016	-0.023	-0.006	0.019
	改正后	0.015	-0.017	0.004	0.019		改正后	0.007	-0.011	-0.003	0.014
GSJY	改正前	0.021	-0.014	0.003	0.017	XJFY	改正前	0.017	-0.012	-0.003	0.018
	改正后	0.011	-0.007	0.002	0.011		改正后	0.009	-0.013	-0.001	0.013
GSLY	改正前	0.044	-0.031	-0.009	0.037	XJHT	改正前	0.027	-0.009	0.004	0.018
	改正后	0.017	-0.012	-0.005	0.015		改正后	0.011	-0.004	0.002	0.014
GSLZ	改正前	0.014	-0.04	-0.013	0.027	XJJJ	改正前	0.006	-0.031	-0.011	0.018
	改正后	0.007	-0.017	-0.005	0.017		改正后	0.002	-0.015	-0.005	0.014
GSMA	改正前	0.014	-0.026	0.004	0.011	XJKC	改正前	0.004	-0.032	-0.015	0.018
	改正后	0.007	-0.017	0.004	0.007		改正后	0.003	-0.015	-0.007	0.013
GSMI	改正前	0.015	-0.013	0.002	0.014	XJKE	改正前	0.018	-0.033	-0.012	0.021
	改正后	0.007	-0.005	0.001	0.005		改正后	0.011	-0.015	-0.009	0.015
GSML	改正前	0.017	-0.026	0.011	0.019	XJKL	改正前	0.015	-0.001	0.055	0.075
	改正后	0.011	-0.017	0.004	0.007		改正后	0.009	-0.001	0.027	0.054
GSMQ	改正前	0.023	-0.034	0.005	0.028	XJML	改正前	0.011	-0.027	-0.008	0.019
	改正后	0.011	-0.016	0.001	0.027		改正后	0.007	-0.008	-0.007	0.013
GSMX	改正前	0.013	-0.026	-0.004	0.019	XJQH	改正前	0.026	-0.009	0.005	0.016
	改正后	0.005	-0.013	-0.001	0.007		改正后	0.011	0.003	0.002	0.011
GSPL	改正前	0.031	-0.034	0.002	0.022	XJQM	改正前	0.017	-0.021	-0.001	0.021
	改正后	0.015	-0.017	0.001	0.013		改正后	0.009	-0.016	0.002	0.017
GSTS	改正前	0.073	-0.016	0.022	0.024	XJRQ	改正前	0.018	-0.015	0.002	0.016
	改正后	0.024	-0.009	0.011	0.021		改正后	0.011	-0.009	0.002	0.014
GSQS	改正前	0.034	-0.031	0.007	0.013	XJSH	改正前	0.015	-0.024	0.005	0.019
	改正后	0.017	-0.019	0.002	0.009		改正后	0.012	-0.015	0.004	0.015

续表 1

测站	状态	最大值	最小值	平均值	标准差	测站	状态	最大值	最小值	平均值	标准差
GSWD	改正前	0.024	-0.032	-0.009	0.018	XJSS	改正前	0.002	-0.011	-0.007	0.016
	改正后	0.011	-0.017	-0.005	0.015		改正后	0.002	-0.009	-0.005	0.07
DXIN	改正前	0.059	-0.029	0.014	0.014	XJTC	改正前	0.032	-0.013	0.011	0.022
	改正后	0.018	-0.012	0.005	0.013		改正后	0.023	-0.007	0.006	0.017
QHBM	改正前	0.034	-0.024	0.002	0.031	XJTZ	改正前	0.022	-0.029	-0.001	0.025
	改正后	0.013	-0.007	-0.001	0.013		改正后	0.019	-0.014	0.002	0.019
QHDL	改正前	0.021	-0.022	0.009	0.020	XJWL	改正前	0.025	-0.016	0.003	0.02
	改正后	0.007	-0.013	0.005	0.009		改正后	0.013	-0.012	0.001	0.016
QHGC	改正前	0.023	-0.019	0.004	0.017	XJWQ	改正前	0.004	-0.037	-0.018	0.02
	改正后	0.005	-0.014	0.002	0.013		改正后	0.004	-0.015	-0.009	0.015
QHGE	改正前	0.021	-0.026	0.001	0.023	XJWU	改正前	0.004	-0.038	-0.015	0.02
	改正后	0.012	-0.013	0.002	0.015		改正后	0.003	-0.014	-0.007	0.017
QHLH	改正前	0.066	-0.01	0.017	0.027	XJXY	改正前	0.041	-0.008	0.016	0.024
	改正后	0.009	0.001	0.011	0.019		改正后	0.019	-0.005	0.007	0.019
QHMD	改正前	0.012	-0.019	0.007	0.011	XJYC	改正前	0.027	-0.026	0.001	0.026
	改正后	0.005	-0.009	0.004	0.005		改正后	0.015	-0.013	0.001	0.021
QHME	改正前	0.032	0.001	0.013	0.011	XJYN	改正前	0.063	-0.041	-0.015	0.052
	改正后	0.012	0.001	0.007	0.007		改正后	0.017	-0.015	-0.009	0.047
QHMQ	改正前	0.074	-0.026	0.006	0.036	XJYT	改正前	0.008	-0.028	-0.009	0.025
	改正后	0.017	-0.011	0.004	0.023		改正后	0.007	-0.012	-0.005	0.017
QHMY	改正前	0.014	-0.048	0.006	0.019	XJZS	改正前	0.036	-0.013	0.013	0.025
	改正后	0.008	-0.021	0.01	0.012		改正后	0.015	-0.007	0.007	0.019
QHQL	改正前	0.046	-0.009	0.013	0.028	XJBL	改正前	0.014	-0.021	0.004	0.019
	改正后	0.014	-0.005	0.008	0.019		改正后	0.005	-0.013	0.003	0.013
QHTR	改正前	0.013	-0.093	0.005	0.053						
	改正后	0.005	-0.019	0.003	0.031						

对站点剔除共模误差前后对比分析, 残差的标准差平均减少 27.5%, 测站减少幅度最大达到 66.7%, 效果显著.

3.2 共模误差周期性

共模误差是一个区域内站点存在的一种多因素导致的误差集合, 因此本文采取多通道奇异谱分析的方法对各种误差进行分离处理并进行周期性探测. 由于篇幅所限本文针对每个省份选取一个代表性站点, 共选取 GSQS, QHMY, XJWQ 三个站点进行分析说明. 图 4~9 给出 GSQS, QHMY, XJWQ 三个测站的共模误差信号分离结果以及周期性探测分析结果, 其

中 20 个子图为前 20 阶的振幅以及周期性探测分析结果. 从图 4 和图 5 可以看出, 共模误差在时间维度上具有明显的周期性变化趋势, 说明共模误差的变化趋势与时空相关, 符合其时空特性. 不同测站的周期性变化具有相似性, 但是在测站以及周期对应的振幅变化特性方面却具有一定差异性.

3.3 地表荷载影响

GNSS 观测数据中固体潮、极潮和海洋潮等影响因素在进行 GAMIT/GLOBK 解算过程中采用 IERS2003 标准模型以及 FES2004 模型进行改正处理, 水文荷载、非潮汐大气以及非潮汐海洋荷载等因

素未进行改正处理。

采用德国地学中心 (GFZ Helmholtz Centre for Geosciences) 提供的水文荷载 (Hydrological Loading, HYDL)、非潮汐大气荷载 (Non-Tidal Atmospheric Loading, NTAL) 以及非潮汐海洋荷载 (Non-Tidal Oceanic Loading, NTOL) 造成地表位移的全球格网数据, 三种荷载数据空间分辨率均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, NTAL 和 NTOL 时间分辨率均为 3 h, HYDL 时间分辨率为 24 h^[18-20]。对 61 个站点的分析结果进行统计分析, 结果表明超过 93% 的站点受到水文荷载的影响最大, 仅 7% 的站点最大影响因素为另外两种地表荷载以及其他未知因素, 水文荷载、非潮汐大气以及非潮汐海洋荷载三种荷载的平均相关系数分别为 41.2%, 22.1%, 8.9%。分析结果得到在三种地表质量荷载对西北三省坐标时间序列影响中, 水文荷载影响最显著, 非潮汐大气荷载次之, 非潮汐海洋影响平稳性最高。将三种荷载与 GNSS 坐标时间序列进行相关性分析, 对比三种荷载平均相关性系数,

通过三种荷载相关性分析得出该地区共模误差主要影响来自水文荷载, 具体结果列于表 2。

图 10~12 为每个省份选取一个代表性站点的三类地表质量负载影响分析结果, 可以看出水文荷载对坐标时间序列产生的影响周期性特征值最为明显, 另外两种荷载影响也具有一定的周期性特征。

4 结论

通过对西北地区新疆、甘肃、青海三个省及自治区 61 个站点近 10 年的观测数据进行解算得到坐标时间序列, 采用 MSSA 算法对坐标时间序列进行数据预处理提高了坐标时间序列的精度与连续性。在此基础上对区域空间滤波实现共模误差提取研究, 将提取的共模误差进行周期性探测以及误差来源分析, 得到如下结论。

(1) 通过多通道奇异谱分析进行共模误差剔除提高了坐标时间序列精度与完整性。对比站点共模误差剔除前后序列, 残差标准差平均精度提高 27.5%, 测

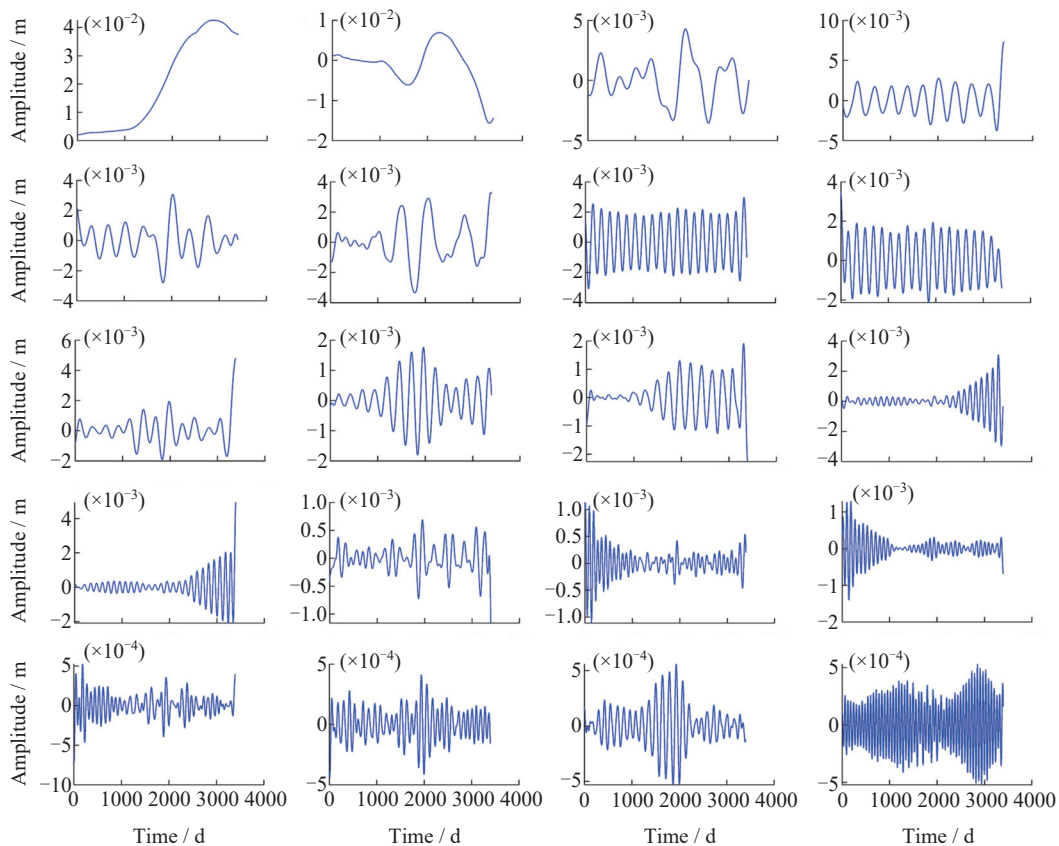


图 4 GSQS 站共模误差信号分离结果

Fig. 4 GSQS station periodic separation results of common-mode error signals

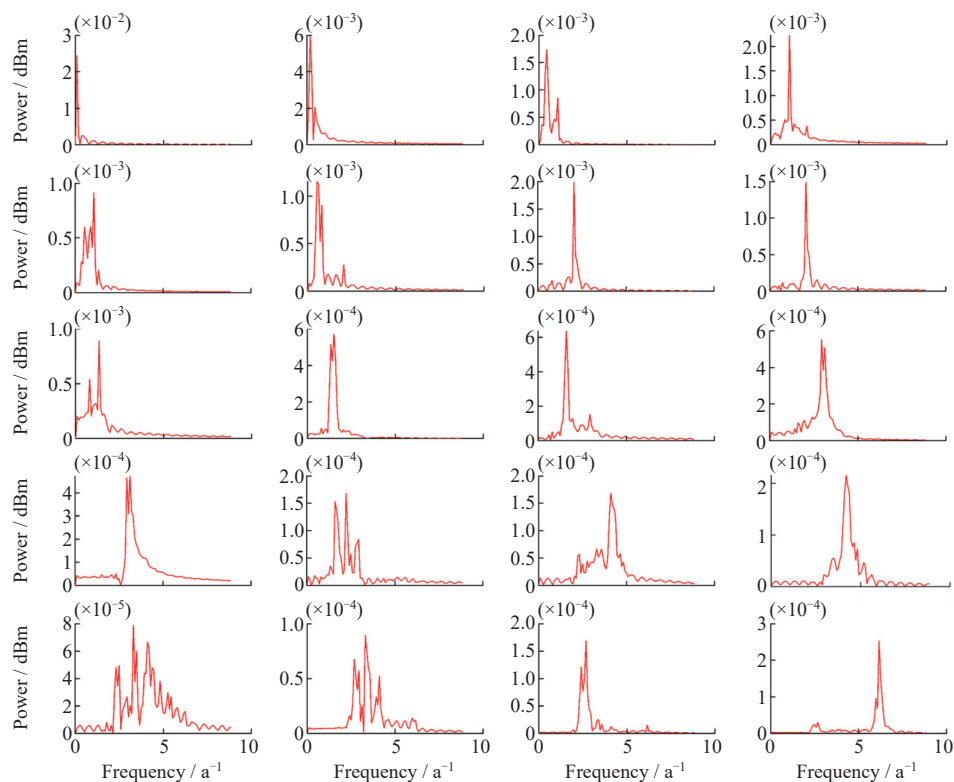


图 5 GSQS 站周期性共模误差检测结果

Fig. 5 GSQS station periodic detection results of common-mode errors

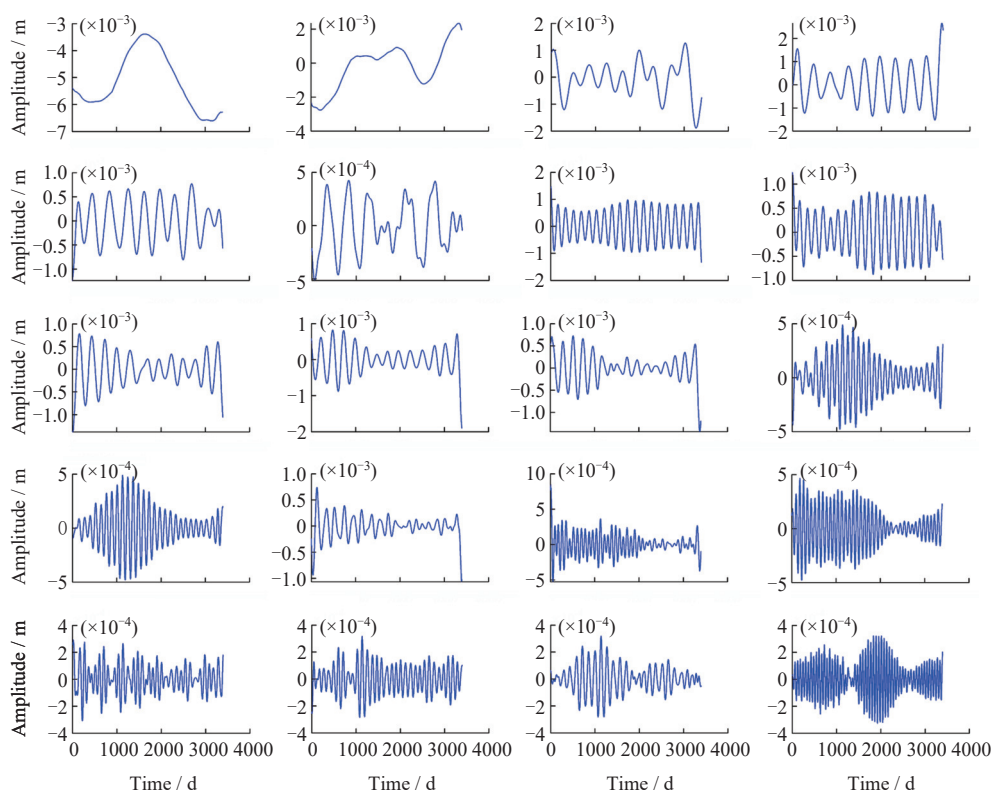


图 6 QHMY 站共模误差信号分离结果

Fig. 6 QHMY station separation results of common-mode error signals

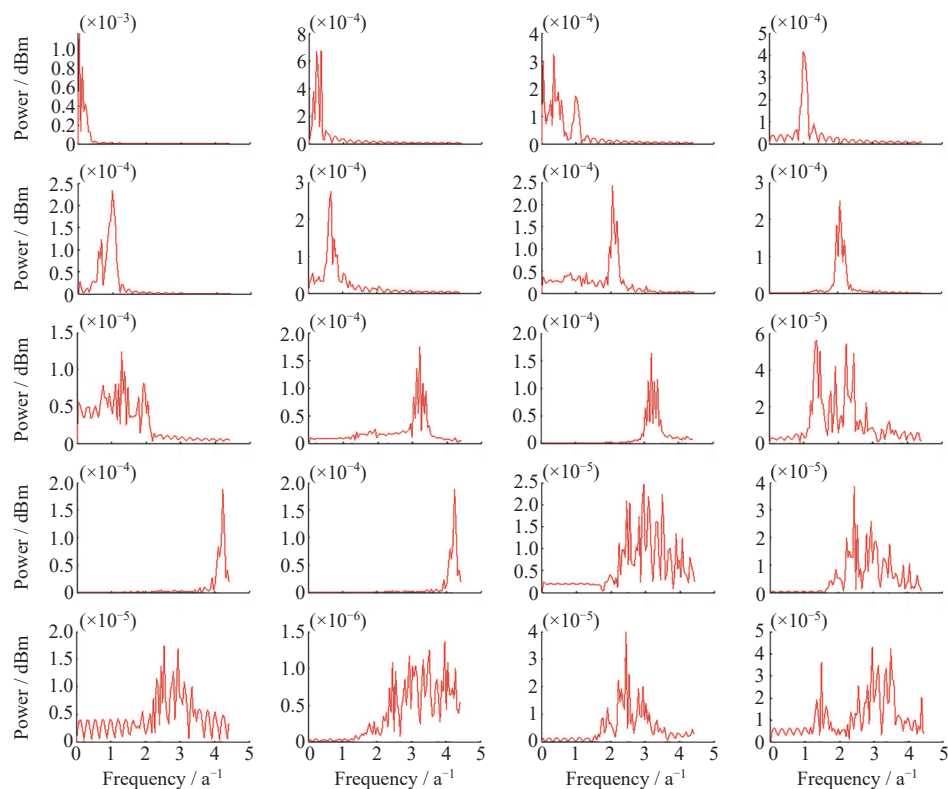


图 7 QHMY 站周期性共模误差检测结果

Fig. 7 QHMY station periodic detection results of common-mode errors

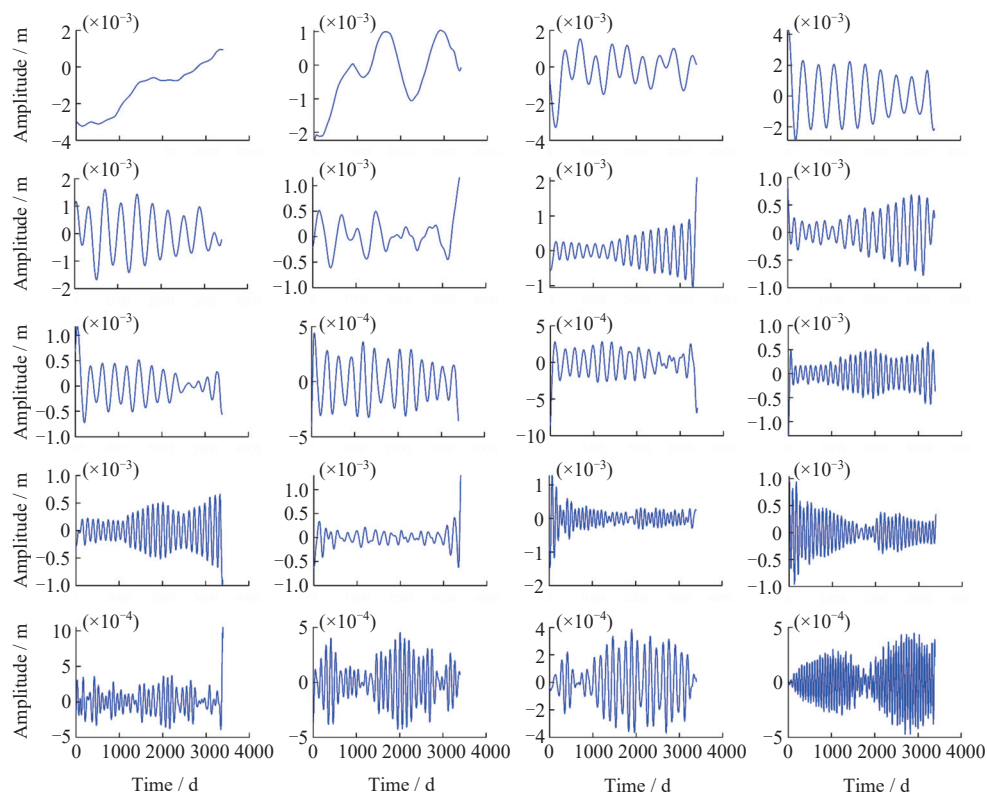


图 8 XJWQ 站共模误差信号分离结果

Fig. 8 XJWQ station periodic separation results of common-mode error signals

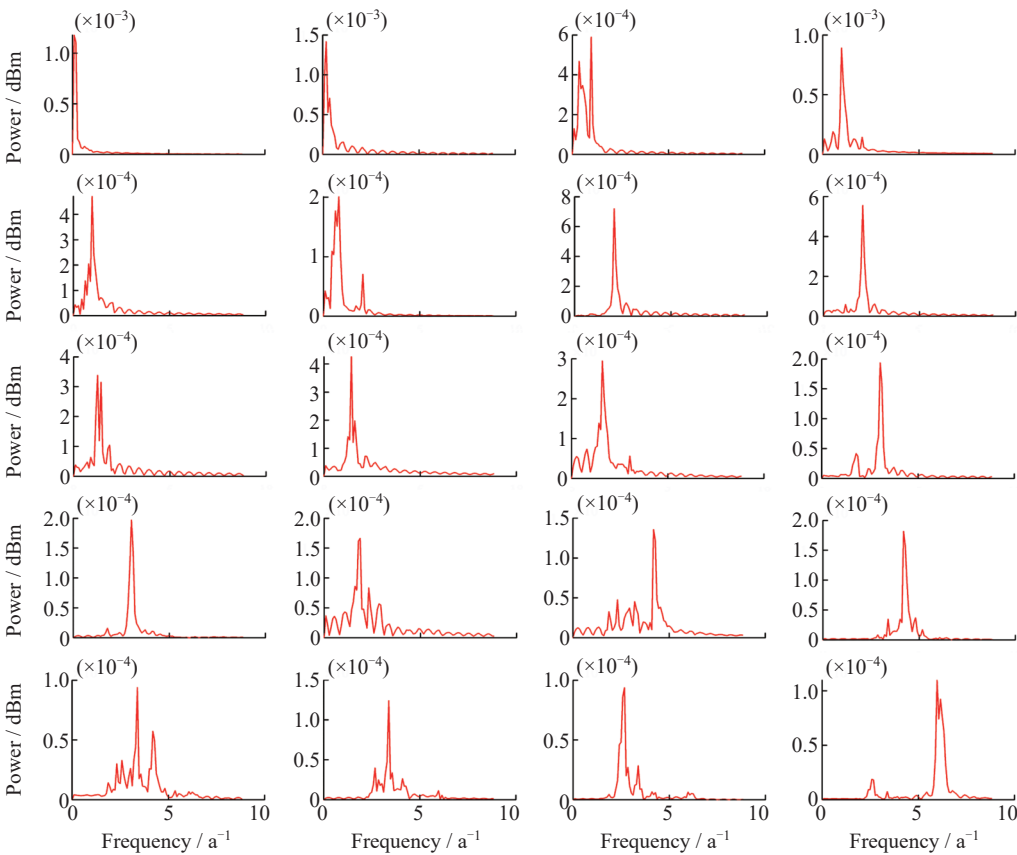


图 9 XJWQ 站周期性共模误差检测结果

Fig. 9 XJWQ station detection results of common-mode errors

表 2 荷载平均相关性系数
Table 2 Average load correlation coefficient

荷载类别	平均相关性系数/(%)
HYDL	41.2
NTAL	22.1
NTOL	8.9

站减少幅度最大达到 66.7%, 精度提高效果显著.

(2) 该区域共模误差在时间维度上具有明显的周期性变化趋势, 说明共模误差变化趋势与时空相关, 符合其时空特性. 不同测站周期性变化具有相似性然而在测站以及周期对应的振幅变化特性方面却具有

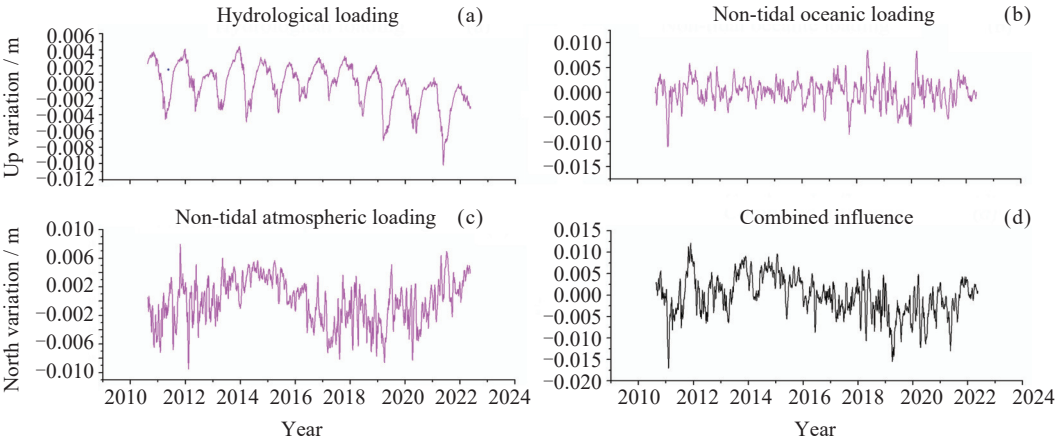


图 10 GSQS 站点荷载分析

Fig. 10 GSQS site load analysis

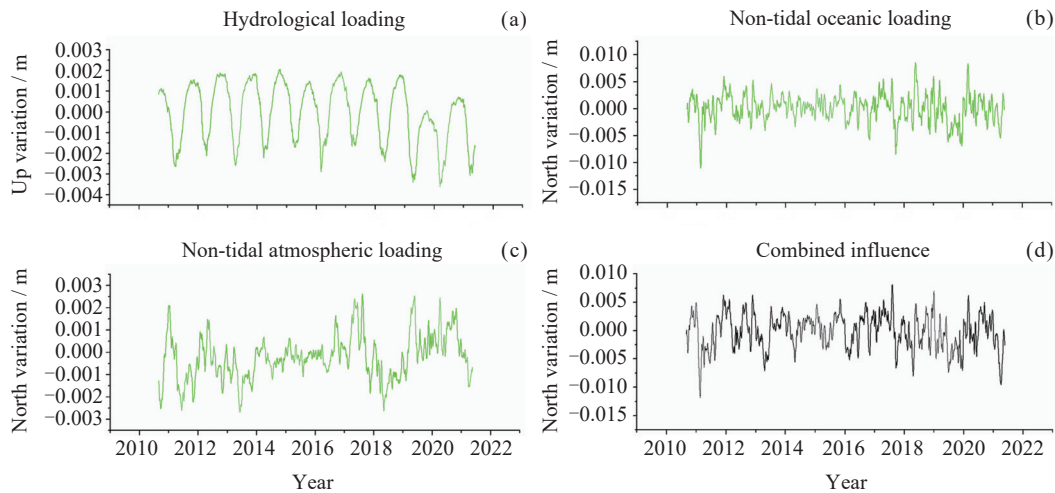


图 11 QHMY 站点荷载分析
Fig. 11 QHMY site load analysis

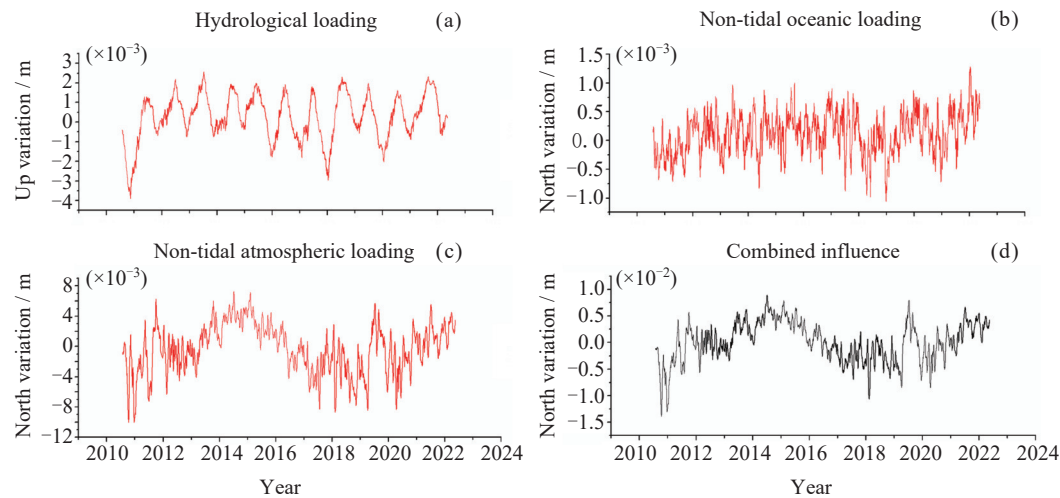


图 12 XJWQ 站点荷载分析
Fig. 12 XJWQ site load analysis

一定差异性。

(3) 分析结果得到该区域共模误差受到三种地表质量荷载影响显著程度从高到低分别水文荷载、非潮汐大气荷载、非潮汐海洋荷载。

参考文献

[1] YAN J, DONG D N, BÜRGMANN R, *et al.* Separation of sources of seasonal uplift in China using independent component analysis of GNSS time series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, **124**(11): 11951-11971
[2] SHENG Chuanzhen, GAN Weijun, LIANG Shiming, *et al.* Identification and elimination of non-tectonic crustal deformation caused by land water from GPS time series in the western Yunnan province based on GRACE observa-

tions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(1): 42-52 (盛传贞, 甘卫军, 梁诗明, 等. 滇西地区 GPS 时间序列中陆地水荷载形变干扰的 GRACE 分辨与剔除 [J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(1): 42-52)
[3] LIAO Hua, XU Rui, CHEN Weifeng, *et al.* Property variation and statistical analysis of Sichuan GPS time series before and after Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(4): 1237-1245 (廖华, 徐锐, 陈维锋, 等. 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*, 2013, **56**(4): 1237-1245)
[4] YANG Bo, ZHOU Wei, CHEN Fuchao, *et al.* The Euler-filter algorithm of recognition and estimation on the common mode white noise of time series for horizontal components of GPS continuous observation stations[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **29**(3): 26-31, 36 (杨博, 周

- 伟, 陈阜超, 等. GPS 连续站水平位置时间序列共模白噪声识别与估计的欧拉-滤波法 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2010, **29**(3): 26-31, 36)
- [5] YANG Bo, ZHANG Fengshuang, HAN Yueping. Euler-wavelet method and its application in identification of common-mode error from time sequences of horizontal components of GPS continuous stations[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, **30**(3): 100-104 (杨博, 张风霜, 韩月萍. 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*, 2010, **30**(3): 100-104)
- [6] WANG Mei, JIANG Zaiden, HOU Hesheng. Correlation analysis of continuous GPS horizontal displacement components[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, **30**(2): 19-24 (王梅, 江在森, 侯贺晟. GPS 连续站水平位移分量相关性分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, **30**(2): 19-24)
- [7] XIE Shuming, PAN Pengfei, ZHOU Xiaohui. Research on common mode error extraction method for large-scale GPS network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, **39**(10): 1168-1173 (谢树明, 潘鹏飞, 周晓慧. 大空间尺度 GPS 网共模误差提取方法研究 [J]. 武汉大学学报•信息科学版, 2014, **39**(10): 1168-1173)
- [8] XIE Shuming, PAN Pengfei, ZHOU Xiaohui. Spatial characteristics analysis of common mode error in GPS coordinate time series[J]. *Geospatial Information*, 2014, **12**(4): 44-45, 54 (谢树明, 潘鹏飞, 周晓慧. GPS 坐标时间序列共模误差空间特性分析 [J]. *地理空间信息*, 2014, **12**(4): 44-45, 54)
- [9] TIAN Yunfeng, SHEN Zhengkang, LI Peng. Analysis on correlated noise in continuous GPS observations[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, **32**(6): 696-704 (田云锋, 沈正康, 李鹏. 连续 GPS 观测中的相关噪声分析 [J]. *地震学报*, 2010, **32**(6): 696-704)
- [10] TAN W J, CHEN J P, DONG D N, et al. Analysis of the potential contributors to common mode error in Chuan-dian region of China[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(5): 751
- [11] WANG Lihong, LU Yangmei, QIU Baoxian. Position affect of GPS/BDS data by GAMIT with different precise ephemeris[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2022, **42**(1): 14-17 (王丽红, 鲁杨梅, 邱宝贤. GAMIT 软件中不同星历对 GPS/BDS 数据定位的影响 [J]. *海洋测绘*, 2022, **42**(1): 14-17)
- [12] HE Yuefan, NIE Guigen, WU Shuguang et al. Ultra-short baseline solution based on different versions of GAMT[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2019, **30**(5): 18-22, 31 (何月帆, 聂桂根, 武曙光, 等. 不同版本的 GAMIT 超短基线数据解算精度分析 [J]. *测绘工程*, 2021, **30**(5): 18-22, 31)
- [13] JIANG Weiping. GNSS Reference Station Network Data Processing Method and Application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017 (姜卫平. GNSS 基准站网数据处理方法与应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017)
- [14] HOU Zengnan, HUANG Zhengkai, WANG Yan, et al. A noise reduction method for GNSS time series based on improved WVSSA algorithm[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, **11**(4): 97-103 (侯增楠, 黄征凯, 王琰, 等. 一种改进 WVSSA 算法的 GNSS 时间序列降噪方法 [J]. *导航定位学报*, 2023, **11**(4): 97-103)
- [15] HE Yuefan. High Precision GPS Data Processing and Time Series Analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (何月帆. 高精度 GPS 数据处理及时间序列分析 [D]. 西安: 长安大学, 2019)
- [16] QIAN Wei, YUE Jianping. Application of MSSA in GPS coordinate sequence analysis[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(9): 49-52, 63 (钱炜, 岳建平. MSSA 在 GPS 坐标序列分析中的应用 [J]. *测绘通报*, 2021(9): 49-52, 63)
- [17] LI Aiguo, PING Shaya, GUO Min. The common mode error extraction of residual series was obtained by improved 3σ method[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, **48**(7): 72-83 (李爱国, 平书哑, 郭敏. 利用改进 3σ 法获得残差序列的共模误差提取 [J]. *测绘科学*, 2023, **48**(7): 72-83)
- [18] YUAN P, LI Z, JIANG W P, et al. Influences of environmental loading corrections on the nonlinear variations and velocity uncertainties for the reprocessed global positioning system height time series of the crustal movement observation network of China[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(6): 958
- [19] CHANG Hang. Research on Environmental Loading Effect in GPS Vertical Time Series[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (常航. GPS 垂向时序中环境负载效应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019)
- [20] DILL R, DOBSLAW H. Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, **118**(9): 5008-5017

作者简介



梁斌 男, 1994 年 12 月出生于山东省青岛市, 现为中国地震局一测工程师, 主要研究方向为 GNSS 数据处理分析研究.
E-mail: skliangbin@126.com



于明雪 女, 1997 年 10 月出生于黑龙江省绥化市, 现为信德智图工程师, 主要研究方向为土地资源利用分析研究.
E-mail: 1171227275@126.com