引文格式：段政明. GNSS测站非线性垂向运动和周期信号提取方法与规律分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 32-38. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.007

GNSS测站非线性垂向运动和周期信号提取方法与规律分析

段政明
（杨凌职业技术学院，陕西 咸阳 712100）

摘　要：基于全球超过600个全球导航卫星系统（GNSS）站点的观测数据，提出了一种结合奇异谱分析和非线性最小二乘拟合的非线性测站速度与多周期信号提取方法，旨在提高非线性垂直运动和多周期信号分析的精度并揭示其的空间分布特征。利用GAMIT/GLOBK 10.7解算数据发现，水平方向（北向和东向）的数据解算精度较高，均优于6 mm；垂向解算精度虽有波动，但整体精度约为8 mm，可满足非线性垂直运动和周期信号分析。陆地垂直运动分析显示，全球超过90%的GNSS测站存在明显的非线性垂直运动，且在不同纬度带和高程区域展现出显著的空间差异性。周期信号分析显示，周期信号的振幅受纬度、海拔和地理环境等因素的综合影响，反映了地壳运动、气候负荷和潮汐效应等多重因素对GNSS垂向坐标的影响。

关键词：GNSS；地壳垂向运动；周期信号；奇异谱分析；非线性最小二乘拟合
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0032-07

Nonlinear Vertical Motion and Periodic Signal Extraction Methods and Pattern Analysis for GNSS Stations

DUAN Zhengming
(Yangling Vocational and Technical College, Xianyang 712100, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of nonlinear vertical motion and periodic signal analysis and reveal their spatial distribution characteristics, we proposed an extraction method for nonlinear station velocities and multi-periodic signals by combining singular spectrum analysis (SSA) and nonlinear least squares fitting based on over 600 global navigation satellite system (GNSS) stations observation data. Using GAMIT/GLOBK 10.7 to calculate data, we found that the horizontal data (northward and eastward) achieved high calculation accuracy, with errors generally less than 6 mm. Although vertical accuracy fluctuated, the overall accuracy was approximately 8 mm, which was sufficient for nonlinear vertical motion and periodic signal analysis. The analysis of terrestrial vertical motion revealed that more than 90% of GNSS stations globally exhibited significant nonlinear vertical movement, with notable spatial variability across different latitude bands and elevation regions. The analysis of periodic signals showed that the amplitude of periodic signals was influenced by latitude, elevation, and geographical environment, reflecting the combined effects of crustal movement, climatic loads, and tidal effects on the GNSS vertical coordinates.

Key words: GNSS, crustal vertical motion, periodic signal, SSA, nonlinear least squares fitting

全球导航卫星系统（GNSS）技术的广泛应用使地球物理学和地壳变形研究得到了新发展[1-2]，尤其是在垂直运动分析领域[3-4]。随着全球气候、地壳运动和人类活动的不断变化，地面垂向运动表现出复杂的非线性特征，且受冰后回弹、地下水抽取和板块碰撞等[5-6]多种因素影响。周期信号的提取不仅有助于研究潮汐效应、大气负荷、地震等自然现象的影响[7-8]，还为地质灾害预测、资源管理和环境保护提供了重要的基础数据[9-10]。随着数据处理技术的进步，采用先进的分析方法提取精确的垂向运动与周期性信号，已成为当前地球物理研究中的重要课题。传统线性分析方法难以有效捕捉非线性动态，对地面变形的理解存在一定的局限性[11-12]。因此，研究GNSS测站的非线性垂向运动与周期信号，可为揭示地壳变形、气候变化对地球表面的影响规律提供更加精确和全面的理解。

随着GNSS技术的不断发展和应用，基于GNSS数据的地壳变形和周期信号提取研究在多个领域取得了显著进展[13-15]。许多学者[16-20]通过分析GNSS测站的坐标时间序列，深入探讨了地壳的三维运动、垂直运动及其时变特征，为区域地震危险评估、海平面变化监测以及地质构造研究提供了重要依据；但大多研究集中在对地壳运动中主要周期性信号（如周年、半年周期）的分析，且通常假设速度和变形具有线性特征，而实际地壳运动中可能存在非线性的速度变化，周期

项目来源：杨凌职业技术学院校内基金资助项目（JB2023-003）；陕西省重点研发计划资助项目（2024NC-YBXM-207）。
作者简介：段政明（1996—），硕士研究生，讲师，主要研究方向为摄影测量与遥感，E-mail：sxnzdzm@163.com。

信号的成分可能更加复杂。鉴于此，本文利用奇异谱分析（SSA）方法提取非线性测站速度，再结合非线性最小二乘拟合和滤波技术提取多种周期信号，最后分析陆地垂直运动和周期运动的特点。

1　数据来源和研究方法

1.1　数据来源

本文选取的研究区为全球沿海区域，GNSS观测数据来源于SONEL数据库（法国海平面观测网），GNSS测站约为650个，数据采样率为30 s。为确保地壳运动估计的稳定性与结果的可靠性，本文选取具备连续观测记录超过3年，且数据完整度不低于70%的站点，数据时间范围为2009—2020年。该范围主要考虑在上述筛选条件下可获取的站点数量已基本满足研究所需的空间覆盖和时间跨度；且采用GAMIT/GLOBK 10.7进行解算在计算资源与效率方面具有较大挑战，2020年以后的GNSS数据目前仍在处理过程中。尽管部分多震区地震活动频繁，但其对GNSS测站数据的影响多表现为短期跳变而非长期缺失，因此大多数活跃区域仍可满足数据质量要求。未来将进一步定量评估筛选策略对空间分布和时间连续性的具体影响，以保障研究结果的代表性与科学性。

本文采用GAMIT/GLOBK10.7处理GNSS观测数据，通过双差解算消除卫星和接收机钟差误差，采用无电离层组合校正一阶电离层效应，同时利用IGS提供的电离层模型进行高阶误差修正。卫星高度角设置为15°。根据参考文献[21]，本文采用Saastamoinen模型和VMF1映射函数校正对流层延迟误差。地球物理修正包括地球固体潮、海洋潮汐负载（FES2014b）和非潮汐大气负载。

1.2　垂向站速度提取方法

SSA是一种时间序列分析方法[22]。与小波分析等方法相比，SSA不依赖于先验模型假设，可有效捕捉时间序列中的非线性趋势，且具备强大的去噪能力，能提取长期趋势和周期性信号，尤其适用于地壳垂直运动等复杂变化的分析。SSA分解的具体步骤为：①构建轨迹矩阵，窗口长度通常设置为常用周期的最小公倍数，本文窗口长度为365，根据所选的窗口长度构建轨迹矩阵 $\boldsymbol{X}$；②对 $\boldsymbol{X}$ 进行奇异值分解，即 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{U\Sigma V}^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 为正交矩阵，$\boldsymbol{\Sigma}$ 为对角矩阵，包含奇异值；③分组重构，时间序列分解后，根据奇异值向量特征进行分组，通常成对出现的为周期项，单独出现的为趋势项，趋势项即为非线性垂向运动序列，对其进行最小二乘线性拟合，即可得到测站运动速度。

1.3　周期信号提取方法

本文提出的信号提取方法结合了SSA、非线性最小二乘拟合与功率谱密度（PSD）模型。首先利用SSA方法提取GNSS时间序列中的非线性趋势项，并通过矩阵构建与特征值分解，有效去除噪声和干扰，揭示信号中的主导趋势和周期性变化；然后利用非线性最小二乘拟合对提取的周期信号进行建模，通过优化算法精确估计周期信号的振幅、相位，进一步分离信号中的周期成分；最后采用PSD模型进行频域分析，通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，识别信号的主导周期频率。PSD模型能准确揭示信号的周期性成分，特别是在震后形变等信号建模中，可有效去除季节性变化、仪器误差等周期性干扰，优化信号提取的精度。其数学公式[23]为：

$$\begin{aligned}x(t)-v_{\mathrm{ssa}}(t)=&\sum_{j=1}^{3}\left[s_j\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_j}t\right)+c_j\cos\left(\frac{2\pi}{\tau_j}t\right)\right]+\\&\sum_{d=1}^{8}\left[s_d\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_d}t\right)+c_d\cos\left(\frac{2\pi}{\tau_d}t\right)\right]+\sum_{f=1}^{3}\left[s_f\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_f}t\right)+\right.\\&\left.c_f\cos\left(\frac{2\pi}{\tau_f}t\right)\right]+\sum_{k=1}^{N_P}P_k(t)+\sum_{i=1}^{N_0}a_iH(t-t_i)\end{aligned}\tag{1}$$

式中，$x(t)$ 为垂向坐标时间序列；$v_{\mathrm{ssa}}(t)$ 为SSA提取的非线性趋势项；a_i、s_j、c_j、s_d、c_d、s_f、c_f 分别为待估参数；τ_j、τ_d、τ_f 分别为季节信号、轨道谐波信号、半月周期信号的周期；$H(t-t_i)$ 为Heaviside阶跃函数，用于表示突变项；$P_k(t)$ 为震后形变信号。

季节信号包括年周期信号（$j=1$）、半年周期信号（$j=2$）、1/3年周期信号（$j=3$）。轨道谐波信号由GNSS卫星轨道的几何特性产生，周期为岁差周期 P_d/365.25。半月周期信号主要受潮汐效应影响，周期为半月周期 P_f/365.25。震后形变信号采用对数—指数或指数—指数模型表示，即

$$P_k(t)=\begin{cases}a_k\log\left(1+\dfrac{t-t_k}{\tau_k}\right), & \log\text{模型}\\ a_k\left(1-e^{-\frac{t-t_k}{\tau_k}}\right), & \exp\text{模型}\\ a_{1k}\log\left(1+\dfrac{t-t_k}{\tau_{1k}}\right)+a_{2k}\left(1-e^{-\frac{t-t_k}{\tau_{2k}}}\right), & \log+\exp\text{模型}\\ a_{1k}\left(1-e^{-\frac{t-t_k}{\tau_{1k}}}\right)+a_{2k}\left(1-e^{-\frac{t-t_k}{\tau_{2k}}}\right), & \exp+\exp\text{模型}\end{cases}\tag{2}$$

1.4 多因子回归分析

本文考虑纬度和高程协同作用对周期信号的影响，并采用多因子回归分析方法进行分析，计算公式为：

$$A=\beta_0+\beta_1 H+\beta_2 B+\beta_3(H+B)+\varepsilon \quad (3)$$

式中，A 为周期信号振幅；β_0 为常数项；β_1、β_2 分别为高程 H 和纬度 B 的回归系数；β_3 为交互项系数；ε 为误差项。

2 研究结果与分析

2.1 数据解算精度分析

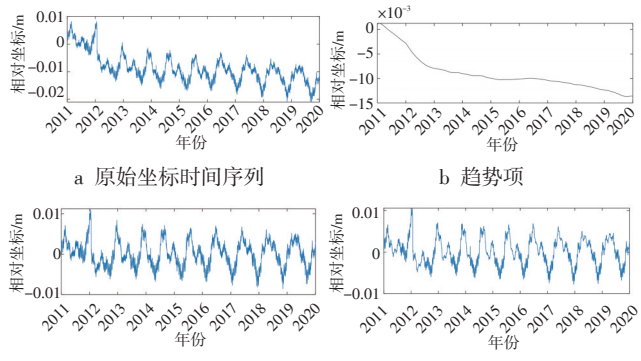
分析垂向时间序列解算精度，不仅能有效评估数据的可靠性，还能为后续的信号提取和运动规律分析奠定基础。本文对GNSS测站垂向坐标时间序列的解算精度进行分析，为后续的非线性垂直运动提取和周期信号分解提供支持。全球600多个GNSS测站三维坐标时间序列（北向N、东向E和垂向U）的解算精度见表1，可以看出，GNSS测站在不同方向上的解算精度存在差异，N和E方向解算精度较好，均优于6 mm，U方向的解算精度波动较大，表现出较高的最大值和标准差，但精度仍可控制在8 mm左右。U方向的解算精度略逊于水平方向的主要原因为U方向对流层和电离层对垂向信号的影响更显著，且垂直方向的几何布局较为“弱”，尽管采用消电离层组合来校正一阶电离层效应，但电离层仍会影响垂向测量；且U方向的测量也面临更多的误差修正挑战。总体来说，虽然垂向运动的解算精度存在一定波动，但各方向数据仍能提供可靠基础，支持后续对非线性垂直运动的提取和周期信号分析。

表1 GNSS数据解算精度统计/mm

分量	最大值	最小值	平均值	标准差
N	56.2	1.1	5.3	5.8
E	45.1	0.8	4.8	5.3
U	77.3	1.4	7.9	8.1

2.2 非线性垂直运动提取与特征分析

陆地垂直运动直接与地球表面变形、地壳运动以及地震活动等地质过程密切相关，在GNSS监测中具有重要意义。大多陆地垂直运动呈现非线性特征，而传统分析方法通常无法有效捕捉和揭示这些非线性变化。SSA方法能精确提取并分析非线性垂直运动，为深入研究地表运动提供更加精确的描述。本文采用高斯滤波方法抑制高频噪声，提高信噪比，使周期信号更加突出。高斯滤波器具有良好的平滑效果，能有效去除信号中的高频成分，同时保留数据的低频趋势。具体参数设计包括：滤波器窗口大小为10个数据点，标准差为0.1 mm。准确提取陆地垂直运动能确保后续分析的准确性和可靠性。限于篇幅，本文仅展示两个GNSS测站的非线性垂直运动的提取结果（图1、2）。

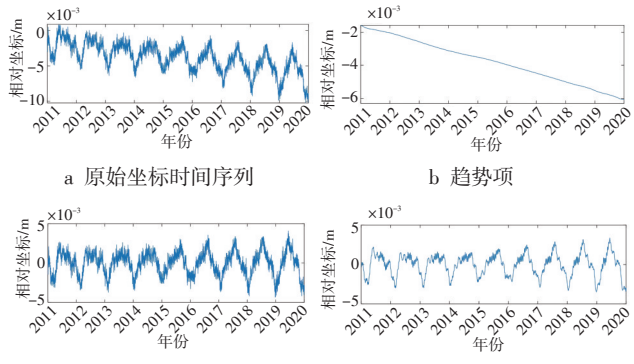


a 原始坐标时间序列　b 趋势项

c 去趋势项后的坐标时间序列　d 滤波后去趋势项的坐标时间序列

图1 CCJ2测站非线性垂直运动信号提取结果

由图1可知，CCJ2测站的原始垂直坐标时间序列不仅呈现显著的非线性波动，还叠加了明显的周期性变化和高频随机干扰。通过SSA方法提取的趋势项揭示了垂直运动的非线性变化趋势，2011—2012年测站的沉降速度明显加快，2013—2016年沉降速度趋于平稳，2016年以后测站再次呈现沉降速度加快趋势。去除趋势项后，时间序列中的波动性得到增强，周期性成分变得更加显著，尤其是年周期和半年周期的波动成分更加突出，但伴随一定的高频噪声。经过进一步滤波处理后，周期性信号得到了明显强化，高频噪声得以有效抑制，主要的周期性波动得以凸显。



a 原始坐标时间序列　b 趋势项

c 去趋势项后的坐标时间序列　d 滤波后去趋势项的坐标时间序列

图2 P224测站非线性垂直运动信号提取结果

由图2可知，P224测站的原始坐标时间序列呈现明显的周期性波动，并伴随高频噪声，波动幅度在不同年份有所变化，呈现显著的沉降趋势。通过SSA方法提取的趋势项揭示了该测站的垂直运动，2011年以后趋势项持续下降，表明该测站的沉降趋势接近线性，但仍能观察到细微的非线性成分。去除趋势

项后，剩余的时间序列呈现更显著的周期性波动，尤其是年周期成分更加突出，仍存在一定的高频噪声。经过进一步滤波处理后，周期性信号得到强化，高频噪声得到有效抑制，主要的周期性波动更加清晰。

本文利用SSA方法对所有测站的垂直坐标时间序列进行分析，结果表明超过90%的测站存在显著的非线性垂直运动，少数测站的垂直运动趋向线性，但伴随轻微的非线性成分。利用SSA方法提取非线性垂直运动更加贴合实际情况，有助于准确捕捉垂直运动的特性，为后续周期信号提取提供更可靠的数据基础。提取非线性垂直运动后，再采用最小二乘拟合方法计算测站的线性运动，并分析全球GNSS测站的垂直运动特征，结果见图3。从分布特点来看，全球GNSS测站的垂直运动在不同纬度带呈现明显的区域性差异。在北半球的高纬度地区，特别是北冰洋沿岸和格陵兰岛附近，垂直运动表现出显著的地壳抬升趋势，最大速度超过1 cm/a，该现象主要与冰后回弹效应密切相关[24]，随着冰盖在末次冰期融化，冰盖的压力消失，地壳开始恢复其原始形态，这些地区的地面逐渐抬升。在中纬度地区，特别是美国和欧洲的部分区域，垂直运动则呈现轻微的下沉趋势，该趋势的形成可能与人类活动密切相关，尤其是地下水的过度开采[25]。地下水的抽取可能导致地面沉降，尤其是在大规模的地下水抽取和城市化进程较显著的地区。赤道附近等低纬度地区的垂直运动速度较慢，但随着时间推移，这些地区的垂直运动仍可能会对局部的地质和生态环境产生一定影响。南半球大部分地区的垂直运动速度较慢，表现较平稳；但南美洲西部沿岸却显示出明显的地壳抬升，该现象可能与太平洋板块与南美洲板块的碰撞和挤压作用密切相关[26]，尤其是在安第斯山脉及其周边区域，显示了地壳在板块碰撞过程中不断调整的过程，且可能与该地区的地震活动密切相关。

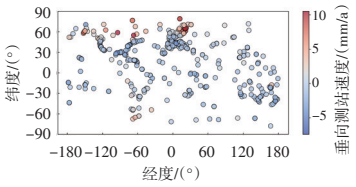
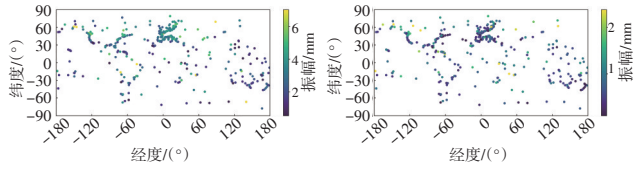


图3　全球GNSS测站垂直运动分析

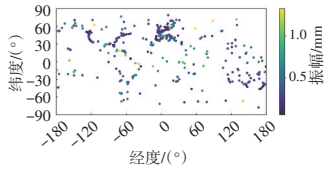
为分析不同纬度地壳垂直运动的特点，本文将由–90°到90°每10°划分一个区间，求取每个区间内GNSS测站垂向速度的平均值，进而分析其随着纬度变化的特点。结果表明，地壳垂直运动随纬度的变化展现出显著的空间分异特征，在50°~80°N范围内，地壳呈显著上升趋势，尤其是在50°N以北的高纬度地区，上升速度较快，平均速度超过4 mm/a，这主要是受到冰后回弹效应的影响；在50°~70°S的南半球地区，地壳同样呈显著上升趋势，但整体上升速度较慢，表明南极及其周边地区也受到冰后回弹或其他地质因素影响，导致地壳持续抬升；在50°S~50°N的中低纬度地区，地壳呈轻微下沉趋势，大部分地区的垂直运动速率小于1 mm/a，地壳运动较平缓，特别是在赤道附近，地壳垂直运动相对稳定，这可能与一些地方的地下水过度开采以及地壳长期缓慢沉降有关。

2.3　周期信号提取与特征分析

在地壳垂直运动分析中，除识别和分析非线性运动趋势外，周期性运动的提取同样重要。周期信号通常反映地壳在长期演变过程中受到的气候变化、潮汐效应和地质活动等多种因素影响，具有重要的科研价值。非线性垂直运动与周期信号往往交织在一起，可能干扰周期性波动的准确识别和分析，因此需去除非线性垂直运动项。利用滤波技术去除高频噪声，使得周期信号的幅度更加突出，波动趋势更加显著。为深入探讨年周期、半年周期、1/3年周期、轨道谐波信号和半月周期等周期信号的空间分布特征，对各周期成分的振幅进行空间分布分析，结果见图4~6。



a 年周期振幅分布　　b 半年周期振幅分布



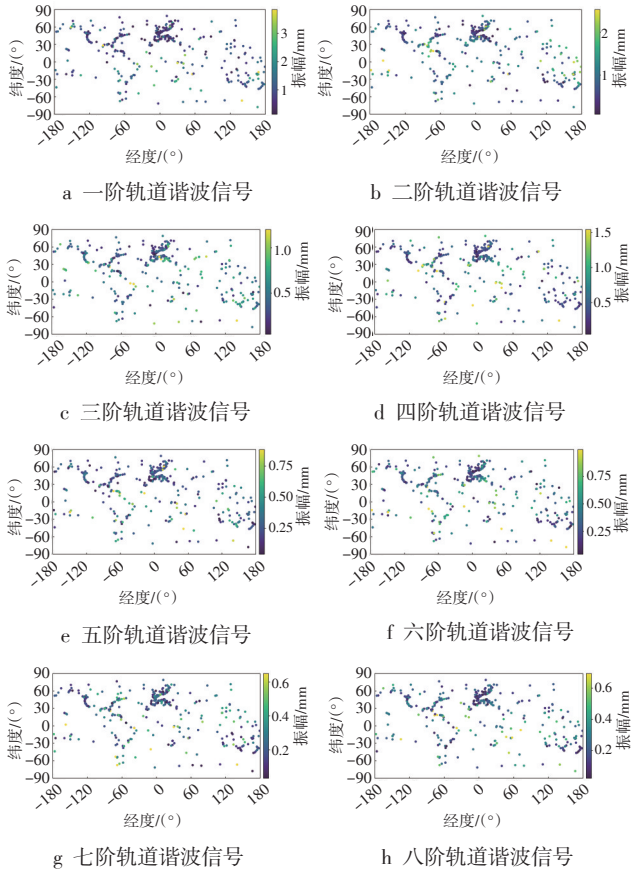
c 1/3年周期振幅分布

图4　长周期信号振幅分布特点

在30°N以北的地区，年周期振幅较显著，特别是60°N以上的部分测站，其年周期信号的振幅超过6 mm；在0°~30°N的测站，年周期振幅明显减小，大部分地区的振幅在2 mm以下；在0°~30°S的测站则呈现较大的周年振幅，而南半球其他大部分测站的周年振幅较小。半年周期信号的振幅在中纬度区域（30°~60°）较小，绝大多数测站的振幅在2 mm以下；而在高纬度地区（超过60°）较大，部分地区的振幅超过2 mm。1/3年周期信号的振幅分布与半年周期信号的特征类

似，低纬度和高纬度区域的振幅较大，中纬度区域的振幅较小。

轨道谐波信号随着阶次的增加，振幅逐渐减小。在地理分布上，南半球的振幅大于北半球，低纬度地区的振幅大于高纬度地区。一阶轨道谐波的振幅最大，部分测站超过3.5 mm，振幅超过3.0 mm的测站很少，主要分布在非洲和南美洲的部分区域。二阶轨道谐波的最大振幅超过2.0 mm，振幅较大的测站分布在墨西哥湾沿岸及其附近岛屿、太平洋中纬度带的一些岛屿。六阶以上轨道谐波信号振幅普遍低于1 mm，说明高阶谐波对GNSS垂向坐标的影响较弱。



a 一阶轨道谐波信号　b 二阶轨道谐波信号

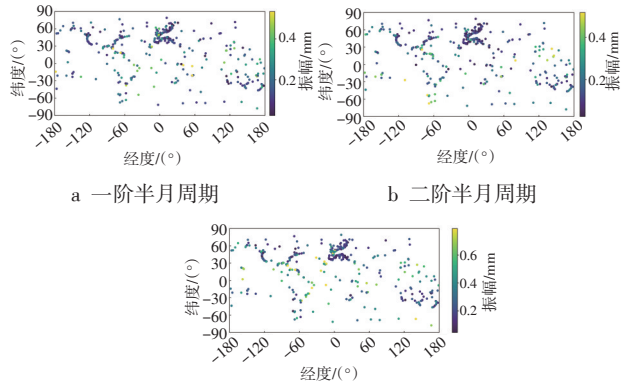
c 三阶轨道谐波信号　d 四阶轨道谐波信号

e 五阶轨道谐波信号　f 六阶轨道谐波信号

g 七阶轨道谐波信号　h 八阶轨道谐波信号

图5 轨道谐波信号振幅分布特点

半月周期信号的振幅空间分布呈现随阶次变化的特点，整体振幅较小，主要集中在0.05~0.80 mm之间。在30°N以北的地区，大多数测站的一阶半月周期信号振幅小于0.20 mm，但在欧洲和北美东部的部分测站振幅较大，超过0.30 mm；在30°N~30°S之间，半月周期信号的振幅较大，大部分测站的振幅超过0.30 mm。二阶半月周期信号的振幅空间分布特征与一阶半月周期信号相似，但在南美洲出现了振幅较大的测站，最大振幅超过0.50 mm。三阶半月周期信号的振幅在30°N以北的测站较小，在30°N~30°S的多数测站振幅较大，



a 一阶半月周期　b 二阶半月周期

c 三阶半月周期

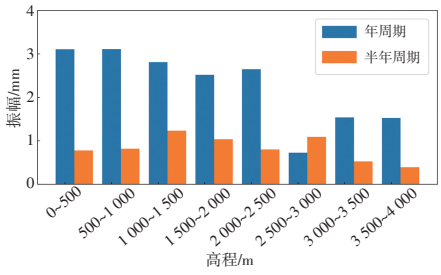
图6 半月周期振幅空间分布特征

在30°~60°S的测站振幅明显减小，在南极洲大部分测站振幅有所增大。

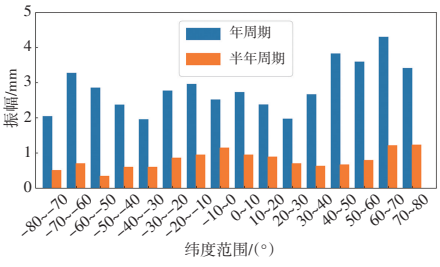
整体而言，GNSS站点的周期性信号振幅分布受地理位置、纬度、区域环境和地壳运动等因素影响。年、半年以及1/3年周期信号的振幅在高纬度地区较显著，说明季节性变化与大气负荷效应对这些区域的影响更明显。轨道谐波信号的振幅随着阶次的增加逐渐减小，低阶谐波信号在高纬度和某些特定经度区域表现出局部增强的现象，而高阶谐波对GNSS垂向坐标的影响较小。半月周期信号的振幅普遍较小，但在高纬度地区和部分特定站点的振幅有所增强，这可能与潮汐负荷效应相关。

本文以年周期信号和半年周期信号为例，分析其与高程和纬度变化的关系，结果见图7，可以看出，年周期信号在低海拔地区（0~500 m）振幅较大，约为3 mm，随着高程的增加，振幅逐渐减小，3 000~3 500 m和3 500~4 000 m高程区间的振幅明显下降，低于1 mm，说明在较高海拔地区，年周期信号的振幅受地理条件（大气变化、气候条件等）的影响较小；半年周期信号的振幅在所有高程区间均较小，尤其是在低海拔地区（0~500 m和500~1 000 m），接近0.5 mm，1 500~2 000 m和2 000~2 500 m高程区间的振幅略有提升，但仍显著低于年周期信号。其原因在于，随着海拔的增加，气象因素的变化对周期信号的影响减弱，且可能存在较少的季节性变化和大气负荷效应。通过计算皮尔逊相关性发现，年周期信号与高程的相关系数为-0.38（显著性为0.02），说明高程的增加与年周期信号振幅呈弱负相关关系；半年周期信号与高程的相关系数为-0.11，说明二者之间几乎没有线性关系。年周期信号和半年周期信号的振幅在80°S~80°N范围内，普遍呈现低纬度和高纬度振幅较大、中纬度

振幅较小的波浪形变化趋势。年周期信号在高纬度地区（40~80°）振幅较大，尤其是在60~70°N之间，振幅达到4 mm，说明该纬度区间年周期信号受大气负荷效应的影响较大；半年周期信号的振幅虽在高纬度地区较大，但振幅普遍小于年周期信号。随着纬度的降低，中纬度地区（30~50°）的振幅逐渐减小，年周期信号振幅降至2 mm左右，半年周期信号则下降至0.5 mm左右。当纬度降至20~30°之间时，振幅再次增大，年周期信号振幅增至3 mm左右，半年周期信号振幅增至1 mm左右，该现象可能与大气负荷效应和季节性变化在高纬度地区更强密切相关。通过定量分析发现，年周期信号与纬度的相关系数为0.41（显著性为0.01），说明二者存在中等强度的正相关关系，尤其在高纬度地区；半年周期信号与纬度的相关系数为0.40（显著性为0.02），呈现较弱的正相关关系。



a 与高程变化的关系



b 与纬度变化的关系

图7　年周期信号和半年周期信号与高程、纬度变化的关系

本文同时考虑了纬度与高程的协同作用对年周期信号和半年周期信号的影响，并采用多因子回归分析方法进行分析。结果表明，纬度对二者均有明显的正向影响，年周期信号、半年周期信号与纬度的回归系数分别为0.013 3、0.001 4，说明随着纬度的增加，年和半年垂直运动的振幅均有所增加；而高程对年周期信号的影响表现为显著负向作用，回归系数为−0.001 1，高程对半年周期信号的影响较小，回归系数为0.000 1，未达到显著性水平。此外，高程与纬度的交互作用对二者的周期信号均未表现出显著影响，回归系数分别为-3.857×10^{-6}和-8.401×10^{-7}，且显著性均大于0.05，说明二者的交互效应对周期信号的解释作用较弱。

3　结　论

本文基于全球超过600个GNSS站点的观测数据，提出了一种结合SSA和非线性最小二乘拟合的非线性测站速度与多周期信号提取方法，利用SSA方法提取非线性趋势项，并结合滤波方法去除高频噪声，以提高信噪比；再对主要周期信号（年、半年、1/3年周期）、轨道谐波信号和半月周期信号的空间分布特征进行分析。研究结果总结如下：

1）水平方向（U和E）的解算精度较高，均优于6 mm。虽然垂向解算精度存在一定波动，但整体平均精度约为8 mm，足以支撑后续的非线性垂直运动分析和周期信号提取。

2）SSA分析结果表明，超过90%的测站表现出显著的非线性垂直运动，少数测站呈现轻微的线性运动。全球垂直运动在不同纬度带表现出明显的区域性差异。北半球高纬度地区（尤其是北冰洋和格陵兰岛附近）受冰后回弹效应影响，垂直运动呈显著上升趋势，最大速度超过1 cm/a。中纬度地区（如美国和欧洲部分区域）则出现轻微下沉趋势，可能与地下水过度抽取等人类活动相关。低纬度地区的垂直运动速率较慢，但随着时间推移仍可能对局部地质和生态产生影响。南半球大部分地区的垂直运动较平稳，但南美洲西部沿岸出现明显的地壳抬升，可能与太平洋板块与南美洲板块的碰撞作用和地震活动相关。总体来看，全球垂直运动的变化受冰后回弹、地下水抽取、板块运动等多重因素影响，展现出复杂的空间差异性和区域性特征。

3）GNSS测站的周期性垂直运动信号在不同纬度和高程区域存在显著差异。年周期信号在高纬度地区振幅较大，尤其在60°N以上，振幅超过6 mm，而在赤道和低纬度地区振幅较小。半年周期和1/3年周期信号在中纬度地区振幅较小，高纬度地区振幅较大。轨道谐波信号的振幅随着阶次增加而减小，低阶谐波在高纬度和特定经度区域有所增强。半月周期信号振幅较小，在高纬度地区有所增大，可能与潮汐负荷效应相关。周期信号的振幅在低海拔地区较大，随着高程的增加逐渐减小。年周期信号的振幅在低纬度和高纬度地区较大，中纬度地区较小，反映了大气负荷效应和季节性变化的影响。

本文分析的GNSS测站主要分布于沿海区域，在

陆地区域的分布存在一定的不均匀性，可能会对GNSS测站较少区域的特征提取带来一定的偏倚。在后续工作中，将持续扩充GNSS测站数据，尤其是加强对全球陆地和数据稀疏区域的补充，力求提升测站分布的空间均匀性，从而更全面、准确地支撑全球地壳运动特征的分析。

参考文献

[1] 罗保林,金飞,罗亮. 自适应卡尔曼滤波在GNSS沉降监测中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(10):73-75

[2] 杨辉,冀康,郭泱泱. 鄂尔多斯块体及其周缘现今地壳水平形变特征及应力应变耦合关系[J]. 大地测量与地球动力学,2025,45(2):157-162

[3] 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

[4] Savchuk S,Doskich S. Monitoring of Crustal Movements in Ukraine Using the Network of Reference GNSS-stations[J]. Scientific Journal Geodynamics,2017,23(2):7-13

[5] 饶维龙,刘斌,唐河,等. 青藏高原地壳隆升的GNSS与GRACE联合研究进展[J]. 地球与行星物理论评(中英文),2025,56(1):26-44

[6] 汤伟尧. 利用深度学习和GNSS研究水负荷位移时空变化[J]. 地理空间信息,2025,23(3):5-8

[7] 徐志新,沈祎凡,亢培峰,等. 顾及GNSS测站分布特征的陆地水储量异常反演[J]. 导航定位学报,2024,12(6):153-161

[8] Kontny B,Bogusz J. Models of Vertical Movements of the Earth Crust Surface in the Area of Poland Derived from Leveling and GNSS Data[J]. ACTA Geodynamica et Geomaterialia,2012,9(3):331-337

[9] 胡月华,姜晓爽,杨超,等. 北京地区GNSS水汽/雾霾时空特征分析[J]. 地理空间信息,2023,21(3):95-97

[10] 朱伟刚,马东,郑宇,等. 利用GNSS垂向位移研究云南地区水文干旱特征[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(3):295-302

[11] 梁洪宝,刘志广,黄立人,等. 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,2015,35(4):589-593

[12] Tretyak K,Dosyn S. Study of Vertical Movements of the European Crust Using Tide Gauge and GNSS Observations[J]. Reports on Geodesy and Geoinformatics,2014,97:112-131

[13] Xu K,Liu J,Liu X,et al. Multiscale Crustal Deformation Around the Southeastern Margin of the Tibetan Plateau from GNSS Observations[J]. Geophysical Journal International, 2020,223(2):1188-1209

[14] 刘希康,丁志峰,李媛,等. EMD在GNSS时间序列周期项处理中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(1):135-145

[15] Mahrous M S,Radwan A M,Abd El-Hafez T,et al. Estimation of Crustal Movements Along the Nile Delta,Egypt Using GNSS Measurements[J]. Egyptian Journal of Aquatic Research,2022,48(4):367-373

[16] 郭鑫伟,刘晓云,田婕,等. 陕西三维速度场模型建立及形变分析[J]. 测绘科学,2022,47(5):26-32

[17] 孟宪纲,占伟,朱文武,等. 晋冀蒙交界地区地壳形变运动和地震活动性研究[J]. 地球物理学进展,2017,32(5):1907-1914

[18] 贾彦锋,朱新慧,孙付平,等. GNSS垂向坐标时间序列周年项振幅的时变特征及成因分析[J]. 地球物理学报,2023,66(1):162-172

[19] Savchuk S,Doskich S,Golda P,et al. The Seasonal Variations Analysis of Permanent GNSS Station Time Series in the Central-east of Europe[J]. Remote Sensing,2023,15(15):3858

[20] Li W,Guo J. Extraction of Periodic Signals in Global Navigation Satellite System (GNSS) Vertical Coordinate Time Series Using the Adaptive Ensemble Empirical Modal Decomposition Method[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2024,31(1):99-113

[21] 张亚豪,温强. 精密单点定位中对流层延迟不同映射模型分析[J]. 大地测量与地球动力学,2025,45(10):1020-1025

[22] Wu Y,Zhao Q,Zhang B,et al. Characterizing the Seasonal Crustal Motion in Tianshan Area Using GPS,GRACE and Surface Loading Models[J]. Remote Sensing,2017,9(12):1303

[23] Gravelle M,Woppelmann G,Gobron K,et al. The ULR-repro3 GPS Data Reanalysis and Its Estimates of Vertical Land Motion at Tide Gauges for Sea Level Science[J]. Earth System Science Data Discussions,2022,22:1-22

[24] Cui J,Aris W A B W,Musas T A,et al. A Comprehensive Review of Seasonal Vertical Crustal Movements from GPS Observations[J]. GeoJournal of Tourism and Geosites, 2025,58(1):335-343

[25] Mora-Paez H,Kellogg J N,Freymueller J T,et al. Crustal Deformation in the Northern Andes: A New GPS Velocity Field[J]. Journal of South American Earth Sciences,2019, 89:76-91

[26] Oceracker J,Hammond W C,Blewitt G,et al. Vertical Land Motion of the High Plains Aquifer Region of the United States: Effect of Aquifer Confinement Style,Climate Variability,and Anthropogenic Activity[J]. Water Resources Research,2022,58(6):e2021WR031635