引文格式：张春宗,徐得贵,钟昌海,等. 基于浮标GNSS的海洋潮汐参数估计及潮汐模型适应性评估[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):86-91. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.04.018

基于浮标 GNSS 的海洋潮汐参数估计及潮汐模型适应性评估

张春宗[1,2]，徐得贵[1,2*]，钟昌海[1,2]，林自乐[1,2]，孔　建[3]，黄　昕[1,2]
（1. 广西壮族自治区自然资源调查监测院，广西 南宁 530023；
2. 自然资源部 北部湾经济区自然资源监测评价工程技术创新中心，广西 南宁 530219；
3. 武汉大学 中国南极测绘研究中心，湖北 武汉 430079）

摘　要：针对海洋浮标平台全球定位系统（GPS）数据估计 *K*1和 *K*2 分潮的海潮参数效果不佳的问题，利用多系统组合GNSS策略精确估计海洋主要分潮参数，提出适用于不同潮汐分量的最佳GNSS系统组合策略，并评估潮汐模型在区域内的适应性。基于动态精密单点定位（PPP）解算技术、低通滤波和调和分析方法，对八大主要海潮分潮（*M*2、*S*2、*N*2、*K*2、*O*1、*P*1、*K*1、*Q*1）的振幅和相位进行了估计与分析。研究使用多系统GNSS观测数据，并结合压力计数据和潮汐模型（FES2022与EOT20）的预测结果，全面评估了不同GNSS系统组合的解算精度和潮汐参数估计精度。结果表明，多系统组合（尤其是GPS+格洛纳斯系统（GLONASS）+伽利略系统（GALILEO）+北斗导航系统（BDS））在大多数分潮中显著优于单GPS系统。此外，在研究区域，FES2022和EOT20海潮模型在高幅分潮（如 *M*2 和 *K*1）表现出较强的预测能力，但在低幅分潮（如 *Q*1）中存在高估偏差。研究验证了多系统GNSS浮标在海潮参数估计中的优势，为提升潮汐参数监测精度和改进区域潮汐模型提供了重要参考。

关键词：海洋潮汐；多全球导航卫星系统组合；振幅；相位；滤波；调和分析
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）04-0086-06

Ocean Tidal Parameter Estimation and Adaptability Evaluation of Tidal Model Based on GNSS Buoy

ZHANG Chunzong[1,2], XU Degui[1,2], ZHONG Changhai[1,2], LIN Zile[1,2], KONG Jian[3], HUANG Xin[1,2]
(1. Guangxi Institute of Natural Resources Survey and Monitoring, Nanning 530023, China;
2. Technology Innovation Center for Natural Resources Monitoring and Evaluation of Beibu Gulf Economic Zone, Ministry of Natural Resources, Nanning 530219, China;
3. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The estimation of tidal parameters, such as K1 and K2 constituent tides, using global positioning system (GPS) data from ocean buoy platforms may yield unsatisfactory results. In this study, we employed a multi-system global navigation satellite system (GNSS) strategy to accurately estimate the main tidal parameters of ocean, proposed an optimal GNSS system combination strategy tailored for different tidal components, and evaluated the adaptability of tidal models within the region. We used the dynamic precise point positioning (PPP) techniques, low-pass filtering, and harmonic analysis to estimate and analyze the amplitudes and phases of eight principal tidal constituents (M2, S2, N2, K2, O1, P1, K1, Q1). We incorporated multi-system GNSS observational data, combined with pressure gauge measurements and tidal model predictions (FES2022 and EOT20) to comprehensively evaluate the positioning accuracy and tidal parameter estimation accuracy of different GNSS system combinations. Results indicate that multi-system GNSS combinations (notably GPS+GLONASS+Galileo+BDS) outperform the single GPS system in most tidal constituents. Additionally, in the study area, the FES2022 and EOT20 tidal models demonstrate strong predictive capabilities for high-amplitude constituents (e.g., M2 and K1), but tend to overestimate low-amplitude constituents (e.g., Q1). This study validates the advantages of multi-GNSS buoys in ocean tidal parameter estimation, providing significant insights for improving tidal parameter monitoring accuracy and enhancing regional tidal models.

Key words: ocean tide, multi-GNSS combination, amplitude, phase, filtering, harmonic analysis

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42274031）；广西重点研发计划资助项目（桂科 AB22080077）；自然资源部北部湾经济区自然资源监测评价工程技术创新中心开放课题（BBW2024001）。
第一作者简介：张春宗（1972—），硕士，高级工程师，主要从事基础测绘、海洋测绘、自然资源调查监测等工作，E-mail：52678166@qq.com。
通信作者：徐得贵（1984—），硕士，高级工程师，主要从事大地测量、工程测量和地理信息工程等工作，E-mail：79364391@qq.com。

近年来，GNSS技术逐渐应用于海潮参数的监测中，为海潮测量提供了一种实时、高精度、可移动的新工具[1-11]。然而，单一GNSS系统（例如全球定位系统（global positioning system, GPS））在应用中也存在显著局限性[12-16]。研究表明，单GPS系统在某些潮汐分潮的估计中（如 $K1$ 和 $K2$ ）精度不足，主要受到多路径效应和轨道误差的影响[17]。特别是由于 $K1$ 和 $K2$ 分潮的潮汐周期与GPS轨道周期（11.97 h）和重访周期（23.93 h）的重叠，导致其估计值易受噪声干扰且精度较低[18-19]。此外，单GPS系统对低幅分潮（如 $Q1$ 、 $P1$ ）的捕捉能力也存在局限，容易受到高频噪声的干扰。

鉴于目前海洋潮汐参数估计的不足，本文提出基于多GNSS浮标观测数据，利用调和分析方法进行八大海洋分潮（ $M2$ 、 $S2$ 、 $N2$ 、 $K2$ 、 $O1$ 、 $P1$ 、 $K1$ 、 $Q1$ ）参数的估计，并将估计结果与压力计观测结果、全球海潮模型等结果进行对比，以验证不同GNSS系统观测数据估计海潮参数精度，最终确定适用于不同潮汐分量的最佳GNSS系统组合策略，同时评估实验区域全球海潮模型的适用性。

1　数据和方法

1.1　数据介绍

本研究采用直径为2 m的GNSS浮标平台，搭载了一台司南M300 GNSS接收机以及扼流圈天线，设置数据采样率为1 s，数据采集时间为2022年5月15日至2022年5月23日，GNSS浮标布放北部湾海域，实验区域水深约30 m。

同时在距离浮标约30 m附近布放了一台高精度压力验潮仪（也称压力计），用于测量水位变化，采样率为1 s，验潮仪精度约为6 mm，因此，本文以压力验潮仪的观测结果作为参考值。压力验潮仪数据采集时间与GNSS相同，压力验潮仪观测数据的绝对基准由GNSS浮标确定。

为了对实测数据进行验证，本文引入了有限元解海潮模型（finite element solution，FES）2022模型和经验海洋潮汐模型（empirical ocean tide model，EOT）20模型。其中，FES2022模型[20]在构建时遵循与FES2014模型类似的方法。与FES2014模型相比，FES2022模型使用最新的高度计标准和高倾角高度计，如Cryosat-2、Saral/AltiKa和Sentinel-3，这允许检索更高纬度的一些潮汐观测数据，以帮助改进极地潮汐建模。另外，FES2022模型在沿海地区具有更高的空间分辨率，并将模型网格系统地扩展到峡湾、河口等区域。该模型在本实验区域的空间分辨率为(1/30)°×(1/30)°。

EOT系列海潮模型是德国地球测量研究所在FES系列模型的基础上，通过对多卫星测高数据进行调和分析建立的一种经验改正模型。EOT20模型在构建时，以FES2014潮汐模型为参考估计信号残余，采用了更多卫星的最新测高数据，使用自适应前沿子波形重跟踪改进沿海区域海平面反演性能、增加海况偏差修正。EOT20可提供17个主要分潮的振幅和相位，空间分辨率(1/8)°×(1/8)°。

1.2　动态精密单点定位解算方法

为验证不同GNSS系统组合的精密单点定位（precise point positioning，PPP）潮位解算精度，分别采用单GPS、GPS+GALILEO+GLONASS+BDS和GALILEO+GLONASS+BDS组合解算[21]，其中GPS、GLONASS、GALILEO和BDS的系统代码分布为G、R、E和C。利用非差无电离层组合模型实现[22]。其第 i 频率的伪距和载波相位原始观测方程为：

$$\begin{cases} P_{r,i}^{s}=\rho_r^s+\mathrm{c}(\delta t_r-\delta t^s)+I_r^s+T_r^s+d_{r,i}-d_i^s+\xi_{r,P}^s \\ L_{r,i}^{s}=\rho_r^s+\mathrm{c}(\delta t_r-\delta t^s)-I_r^s+T_r^s+b_{r,i}-b_i^s+\lambda_i N_{r,i}^s+\xi_{r,L}^s \end{cases} \tag{1}$$

式中， $P_{r,i}^{s}$ 和 $L_{r,i}^{s}$ 分别为第 i 频率对应的伪距观测值和载波相位观测值； ρ_r^s 为站星几何距离； c 为真空中光速； λ 为波长； δt_r 和 δt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差； I_r^s 为电离层延迟； N 为整周模糊度； T_r^s 为对流层延迟； $d_{r,i}$ 和 d_r^s 为第 i 频率上的接收机端伪距偏差和卫星端伪距偏差； $b_{r,i}$ 和 b_i^s 为第 i 频率上的接收机端的相位偏差和卫星端的相位偏差； $\xi_{r,P}^s$ 和 $\xi_{r,L}^s$ 分别为伪距观测和载波相位观测中存在的多路径效应以及观测噪声。

对于GPS、GLONASS、GALILEO和BDS四系统组合观测模型可以表示为[18]：

$$\begin{cases} P_{r,i}^{G}=\rho_r^G+c(\delta t_r-\delta t^G)+I_r^G+T_r^G+d_{rG,i}-d_i^G+\xi_{r,P}^s \\ P_{r,i}^{R}=\rho_r^R+c(\delta t_r-\delta t^R)+I_r^R+T_r^R+d_{rR,i}-d_i^R+\xi_{r,P}^s \\ P_{r,i}^{E}=\rho_r^E+c(\delta t_r-\delta t^E)+I_r^E+T_r^E+d_{rE,i}-d_i^E+\xi_{r,P}^s \\ P_{r,i}^{C}=\rho_r^C+c(\delta t_r-\delta t^C)+I_r^C+T_r^C+d_{rC,i}-d_i^C+\xi_{r,P}^s \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} L_{r,i}^{G}=\rho_r^G+c(\delta t_r-\delta t^G)-I_r^G+T_r^G+b_{rG,i}-b_i^G+\lambda_i N_{r,i}^G+\xi_{r,L}^s \\ L_{r,i}^{R}=\rho_r^R+c(\delta t_r-\delta t^R)-I_r^R+T_r^R+b_{rR,i}-b_i^R+\lambda_i N_{r,i}^R+\xi_{r,L}^s \\ L_{r,i}^{E}=\rho_r^E+c(\delta t_r-\delta t^E)-I_r^E+T_r^E+b_{rE,i}-b_i^E+\lambda_i N_{r,i}^E+\xi_{r,L}^s \\ L_{r,i}^{C}=\rho_r^C+c(\delta t_r-\delta t^C)-I_r^C+T_r^C+b_{rC,i}-b_i^C+\lambda_i N_{r,i}^C+\xi_{r,L}^s \end{cases} \tag{3}$$

表1总结了本文的GNSS解算策略，在此精密单点定位（precise point positioning，PPP）模型中，来自4个GNSS系统的所有观测值都使用最小二乘方法进行批处理。对流层延迟模型采用Saastamoinen模型，对流层映射函数采用GMF。卫星轨道产品、钟差产品、地球自转参数产品、四元数产品和相位偏差产品均从武汉大学IGS数据中心（gnsswhu.cn）下载。

表1 动态PPP处理参数

项目	策略
软件	PRIDE PPP-AR
IGS产品下载	武汉大学IGS数据中心
天线校正	IGS20.atx
平差模型	最小二乘批处理
历元间隔	1 s
时间系统	GPS时
截止高度角	7°
卫星系统	GPS、GALILEO、GLONASS和BDS
对流层延迟	Saastamoinen模型+随机游走过程

1.3 分潮参数估计方法

在经典潮汐调和分析模型中，水位被视为一系列余弦函数线性叠加的结果[23]，每一个余弦函数代表一个分潮：

$$h(t)=h_0+\sum_{i=1}^{n}\left(H_i\cos(\omega_i t-g_i)\right) \tag{4}$$

式中，$h(t)$为时刻t对应的水位；ω_i、H_i、g_i为第i个分潮对应的角频率、振幅和迟角；h_0为平均水位高。

公式（4）可以线性化为公式（5）：

$$h(t)=h_0+\sum_{i=1}^{n}(a_i\cos\omega_i t+b_i\sin\omega_i t) \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases}a_i=H_i\cos g_i\\ b_i=H_i\sin g_i\end{cases} \tag{6}$$

根据公式（6）即可得到分潮的振幅和迟角：

$$\begin{cases}H_i=\sqrt{a_i^2+b_i^2}\\ g_i=\arctan(\dfrac{b_i}{a_i})\end{cases} \tag{7}$$

由于观测数据时间长度较短，无法将$K1$、$P1$、$S2$和$K2$分潮完全分离，故分别采用$K1$、$P1$、$S2$和$K2$分潮的差比关系将$P1$、$K2$从$K1$和$S2$中分离出来，推论参数来自于FES2022海潮模型。

2 结果与分析

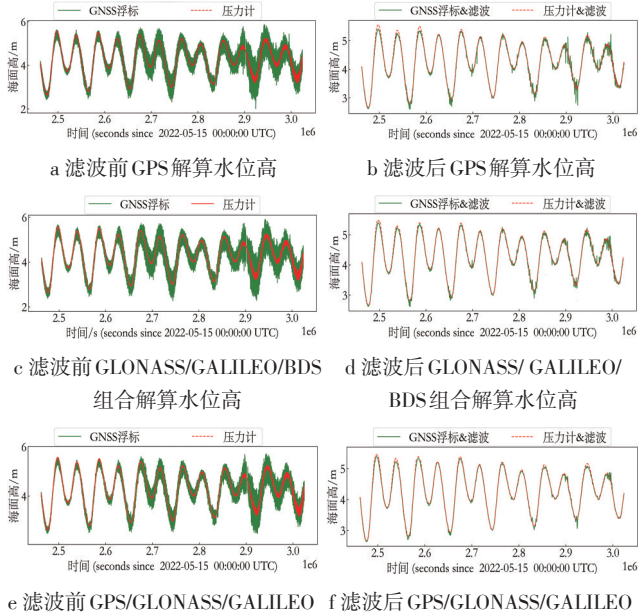
2.1 海洋浮标平台GNSS水位解算

首先使用PPP方法对不同系统组合的GNSS数据进行解算，然后使用3倍标准差原则对解算结果进行粗差探测和剔除，最后以天为单位对数据解算的内符合精度进行统计，结果如表2所示。

表2 数据解算精度统计

系统	方向	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
GREC	N	0.412	0.011	0.082	0.083
	E	0.431	0.014	0.089	0.094
	U	0.532	0.018	0.124	0.142
REC	N	0.421	0.011	0.088	0.085
	E	0.433	0.015	0.090	0.094
	U	0.541	0.020	0.125	0.148
G	N	0.511	0.011	0.094	0.098
	E	0.521	0.020	0.098	0.105
	U	0.687	0.022	0.135	0.167

表2展示了GREC、REC、G 3种GNSS系统组合在动态PPP方法下的浮标数据解算精度统计结果。分析表明，不同系统组合在北、东、垂直方向的最大值、最小值、平均值和标准差均存在差异，多系统组合对解算精度影响显著。多系统组合（GREC、REC）在北、东方向的解算精度优于单系统（G）。GREC系统北、东方向标准差分别为0.083、0.094 m，低于单GPS系统的0.098、0.105 m，REC系统与GREC相近。在垂直方向，GREC系统标准差为0.142 m，较单GPS系统0.167 m减少约15%，但与REC系统0.148 m相比改进幅度较小。单GPS系统北、东、垂直方向解算平均值均高于GREC系统，多系统组合整合不同系统优势，整体解算精度和一致性更优。此外，本文采用低通滤波技术处理GNSS浮标和压力计观测海面高数据，以消除波浪及高频噪声对海洋潮汐的影响，对比滤波前后不同系统组合的水位高解算结果与压力计观测水位数据，结果如图1所示。



a 滤波前GPS解算水位高　b 滤波后GPS解算水位高

c 滤波前GLONASS/GALILEO/BDS组合解算水位高　d 滤波后GLONASS/ GALILEO/BDS组合解算水位高

e 滤波前GPS/GLONASS/GALILEO/BDS组合解算水位高　f 滤波后GPS/GLONASS/GALILEO/BDS组合解算水位高

图1 不同卫星系统组合解算水位高与压力计水位高对比

从滤波前的结果来看，单GPS系统（图1a）能够捕捉到潮汐信号的主要变化趋势，但其解算数据中噪声较为显著，尤其是在高潮和低潮点处，与压力计观测数据之间存在一定偏差。这种偏差主要表现在数据波动幅度过大，随机误差较高，反映出单GPS系统在受到多路径效应和轨道误差影响时的局限性。由于单一系统只能依赖较少的卫星数据，信号受到干扰时无法得到有效修正，导致解算结果的精度较低。相比之下，GPS/GLONASS/GALILEO/BDS四系统组合（图1e）在滤波前的结果表现最为优越，其解算数据与压力计曲线吻合较好，多系统组合在未滤波状态下的表现优于单GPS系统，其数据波动幅度明显减小，显示出多系统协同观测对噪声抑制的显著作用。

在低通滤波后的结果中，所有系统的解算精度均得到了明显提升。对于单GPS系统（图1b），滤波后数据波动显著减小，整体平滑性得到改善。然而，单GPS系统在极值点（高潮和低潮）仍存在一定偏差，表明滤波虽然在一定程度上抑制了随机噪声，但单系统的轨道周期噪声等系统性误差未能完全消除。相比之下，GLONASS/GALILEO/BDS三系统组合（图1d）的滤波后结果显示出更高的拟合精度，其潮汐极值点的解算结果与压力计观测曲线更加一致，尤其是在高潮点的捕捉上表现更为准确。这表明多系统协同作用进一步强化了滤波效果，降低了解算结果中的残余误差。

对于GPS/GLONASS/GALILEO/BDS四系统组合（图1f），滤波后结果表现出最佳精度。解算数据的随机噪声几乎完全消除，压力计曲线与GNSS浮标解算结果的重合度达到最高水平。特别是在低幅潮汐（如微弱潮汐波动）和转折点处，四系统组合能够准确反映潮汐信号的真实特征。这种改进主要归因于多系统的联合观测提供了更多的观测冗余，有效分散了高频噪声，同时进一步优化了解算结果的平滑性和连续性。

综上所述，不同系统在滤波前后的表现差异显著。单GPS系统能够捕捉潮汐信号的主要变化，但在高频噪声抑制和潮汐极值点的拟合精度方面表现出明显局限性。GLONASS/GALILEO/BDS三系统组合显著降低了解算数据的随机噪声，拟合精度较单GPS系统明显提高。而GPS/GLONASS/GALILEO/BDS四系统组合在数据平滑性和潮汐特征捕捉能力方面表现最佳，验证了多系统GNSS协同观测在潮汐监测中的优势。

对滤波前后不同GNSS组合解算的水位高和压力计观测的水位差异进行统计，分析GNSS浮标观测水位的性能，统计结果如表3所示。

表3　滤波前后GNSS与压力计水位差值统计

指标	滤波前			滤波后		
	G	REC	GREC	G	REC	GREC
最大值/m	1.322	0.987	0.921	0.322	0.305	0.286
最小值/m	0.005	0.004	0.003	0.005	0.002	0.002
平均值/m	0.098	0.085	0.083	0.016	0.014	0.012
标准差/m	0.125	0.112	0.102	0.024	0.019	0.016

表3展示了滤波前后，不同GNSS系统组合的解算水位高与压力计观测水位的差值统计结果。

从滤波前后的对比来看，多系统组合（尤其是GREC）的解算性能提升更为显著。相较于单GPS系统，GREC系统通过引入更多的观测冗余和不同轨道几何分布，在高频噪声抑制和潮汐信号捕捉能力上表现出显著优势。REC系统的性能亦优于单GPS系统，但略逊于GREC系统，表明GPS信号的加入在提升解算结果的整体精度方面具有重要作用。

2.2　海潮参数估计

得到高精度的潮位数据后，使用调和分析算法对八大海潮分潮的振幅和相位进行提取，以压力计测得的海潮参数为参考值，对基于多系统组合GNSS测得的海潮参数进行精度评定，并引入FES2022、EOT20海潮模型预测的海潮参数作为辅助验证，同时验证海潮模型的适用性，结果如图2和图3所示。

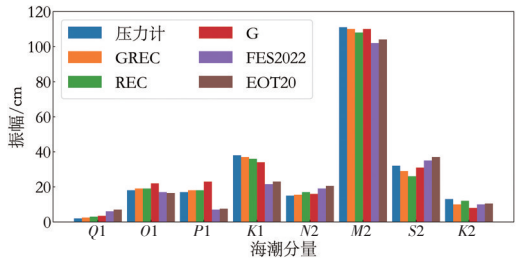


图2　振幅参数估计结果

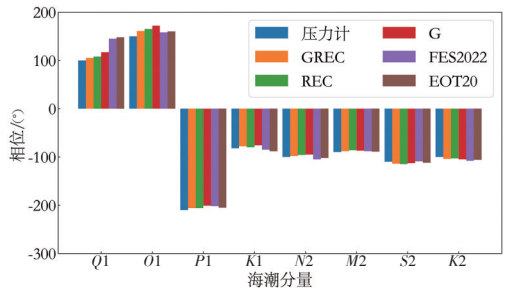


图3　相位参数估计结果

由图2可知，从整体来看，不同系统和模型对主要海潮分量的振幅估计均表现出显著的潮汐特征。其中，*M*2分潮的振幅最大，达到约110 cm，明显高于其他分潮；*K*1、*O*1和*S*2分潮次之，振幅范围大约为20~40 cm；低幅分潮如*Q*1、*P*1和*K*2的振幅较小，通常低于20 cm。这种振幅分布符合典型海潮变化特征，表明不同GNSS系统和潮汐模型能够有效捕

捉主要的潮汐信号。

从不同系统组合的结果来看，以压力计数据为参考，单GPS系统与多系统组合在不同海潮分潮的表现中存在显著差异。对于*Q*1、*O*1和*P*1等低幅分潮，GREC系统的振幅估计最为接近压力计数据，其精度相比单GPS系统分别改善了28.6%、13.6%和21.7%。在高幅分潮如*K*1和*M*2中，GREC系统同样表现最优，相较于单GPS系统，精度改善幅度分别为8.8%和1.9%。而对于*N*2分潮，REC系统的表现稍优于GREC系统，改善幅度为3.1%。值得注意的是，在*S*2分潮中，单GPS系统的估计结果最接近压力计数据，多系统组合未显示出明显优势；而在*K*2分潮中，GREC系统再次展现出其优越性，精度相比单GPS系统改善了25.0%。

FES2022和EOT20模型在振幅估计上的表现与GNSS系统和压力计数据具有一定的一致性，尤其在高幅分潮（如*M*2和*K*1）中，其估计值与压力计的误差较小，例如在*M*2分潮中，FES2022和EOT20的振幅分别为102 cm和104 cm，仅比压力计低7~9 cm。然而，在低幅分潮中，这2种潮汐模型的表现明显偏高，如*Q*1分潮中，FES2022和EOT20分别估计为6 cm和7 cm，显著高于压力计的2 cm，这种偏差可能是由于全球潮汐模型在区域适应性上的不足。综合分析表明，FES2022和EOT20在高幅分潮的估计上具有较强的预测能力，但在低幅分潮上的准确性仍需进一步优化。

图3中展示了压力计、多系统GNSS组合以及海潮模型估计的海潮分潮相位参数。

从图3可知，不同系统和模型对主要海潮分量的相位估计表现出一定差异。整体来看，压力计数据作为参考，八大海潮分潮的相位值分布较为规律，展现出潮汐变化的基本特征。其中，*Q*1和*O*1分潮的相位为正值，分别达到100°和150°，而*P*1、*K*1、*N*2、*M*2、*S*2、*K*2分潮的相位为负值，范围在–210°~–80°之间。这种分布规律与潮汐理论相符，表明不同系统和模型能够反映海潮分潮的相位特性，但精度和误差表现存在差异。

以压力计数据为参考，单GPS系统（G）与多系统组合（GREC和REC）在相位估计中的表现存在显著差异。在*Q*1、*O*1、*N*2和*M*2分潮中，GREC系统的相位估计最接近压力计数据，*Q*1分潮的误差为5°，*O*1分潮的误差为11°，*N*2分潮的误差为2°，*M*2分潮的误差为2°，误差相对与单GPS系统分别降低12、11、3°和1°。在*P*1分潮中，REC系统与GREC系统的相位估计值均为–206°，与压力计数据最接近，相比单GPS系统减少了约5°的偏差。在分潮*S*2中，单GPS系统的表现略优于多系统组合，相比GREC和REC系统表现更为接近压力计数据。而对于*K*1和*K*2分潮，REC系统的表现优于其他系统，*K*1分潮的相位误差为2°，*K*2分潮的相位误差为3°，均优于单GPS系统和GREC系统。这主要是由于REC系统组合中删除了GPS的数据，从而避免引入GPS的轨道误差。

潮汐模型FES2022和EOT20的相位估计表现出较为一致的趋势，尤其在*P*1、*K*1和*M*2分潮中，与压力计数据的误差较小，例如在*P*1分潮中，FES2022的相位误差仅为2°，表现接近于REC和GREC系统。然而，在低幅分潮*Q*1和*O*1中，FES2022和EOT20的相位估计明显偏高，误差分别达到45°和10°，显示出全球潮汐模型在区域适应性上的不足。这种偏差可能是由于潮汐模型的参数化方法对低幅分潮的精确捕捉能力有限。

综上所述，GREC系统在多数分潮（如*Q*1、*O*1、*P*1、*O*1、*M*2、*N*2）中表现最佳，这主要是因为多系统可以提供更多的观测数据，通过不同的算法能够有效减轻这些误差的影响。而REC系统在部分分潮（如*K*1和*K*2）中具有更优的表现，这主要是因为GPS轨道误差的周期与*K*2和*K*1分潮高度重合，删除GPS系统的数据可以避免引入GPS轨道误差。单GPS系统在中幅分潮（如*S*2）上表现出色，精度甚至优于多系统组合，这可能是因为*S*2分潮振幅较小，受噪声扰动影响相对较大，局部结果优于多系统组合具有一定偶然性，该结果不代表单系统优于多系统，而是特定分潮与系统误差特征综合作用的体现。以上结果表明，对于多数分潮多系统组合能够通过协同作用提升振幅估计的精度，但在某些特定分潮中，单系统仍具有一定优势。

3 结 语

本研究基于海洋浮标平台的GNSS观测数据，利用动态PPP解算技术、低通滤波和调和分析方法，精确估计了八大主要海潮分潮（*M*2、*S*2、*N*2、*K*2、*O*1、*P*1、*K*1、*Q*1）的振幅和相位参数。通过对比分析GPS、GLONASS、GALILEO、BDS及其多系统组合在分潮振幅与相位估计中的表现，评估了各系统组合对海潮参数估计精度的影响，明确了多系统

联合观测在提升高频分潮稳定性和抑制噪声方面的优势，提出了基于GNSS估计海洋潮汐分潮参数的最佳GNSS系统组合策略。通过对GNSS浮标与压力计观测数据以及潮汐模型（FES2022和EOT20）预测结果的对比分析，系统评估了不同GNSS系统组合对潮汐参数估计的精度。通过融合多系统GNSS（如GREC、REC等）的观测数据，有效克服了传统单GPS系统中轨道误差和多路径效应对海潮参数估计的影响，显著提升了低幅分潮（如$Q1$、$K2$）和高幅分潮（如$M2$、$K1$）的振幅和相位估计精度。同时验证了潮汐模型在实验区域的适用性。

参考文献

[1] 周秀一,王井利,李如仁,等. 基于BDS卫星信噪比反演海平面高度研究[J]. 地理空间信息,2023,21(7):44-48

[2] Adebisi N, Balogun A L, Min T H, et al. Advances in Estimating Sea Level Rise: A Review of Tide Gauge, Satellite Altimetry and Spatial Data Science Approaches[J]. Ocean & Coastal Management,2021,208:105632

[3] 赵宇鹏,付兴武,汪连贺,等. 渤海湾西部高精度潮汐模型构建和实例应用分析[J]. 海洋湖沼通报,2021,43(6):1-5

[4] Zaron E D, Elipot S. Estimates of Baroclinic Tidal Sea Level and Currents From Lagrangian Drifters and Satellite Altimetry[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2024,41(8):781-802

[5] 冯建强,边超,王乾. 海潮模型在北斗精密单点定位中的影响分析[J]. 地理空间信息,2023,21(9):124-127

[6] Srinivasan M, Tsontos V. Satellite Altimetry for Ocean and Coastal Applications:A Review[J]. Remote Sensing, 2023, 15(16):3939

[7] 刘清超,孙和平,王泽民,等. 南极中山站的重力和区域海洋潮汐特征[J]. 测绘学报,2018,47(3):316-323

[8] Yu Q, Pan H, Gao Y, et al. The Impact of The Mesoscale Ocean Variability on the Estimation of Tidal Harmonic Constants Based on Satellite Altimeter Data in the South China Sea[J]. Remote Sensing,2021,13(14):2736

[9] Zaron E D, Musgrave R C, Egbert G D. Baroclinic Tidal Energetics Inferred from Satellite Altimetry[J]. Journal of Physical Oceanography,2022,52(5):1015-1032

[10] 姜英明,高屹,黄令勇,等. 高噪声状态下潮汐信号提取[J]. 全球定位系统,2024,49(2):82-87

[11] 单瑞. GNSS浪潮参数反演方法与应用[J]. 测绘学报,2023,52(12):2228

[12] 马旭文,田一翔,叶文凯. 南极潮汐测量及区域潮汐对冰架表面流速影响的研究进展综述[J]. 极地研究,2017,29(1):11-22

[13] 许安迪,陈学恩. 基于卫星高度计数据的全球海洋潮汐特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(1):1-8

[14] 李大炜,李建成,金涛勇. 基于卫星测高数据的潮汐分析方法对比研究[J]. 海洋测绘,2017,37(2):20-23

[15] Wang N, Xu T, Gao F, et al. Sea-level Monitoring and Ocean Tide Analysis Based on Multipath Reflectometry Using Received Strength Indicator Data from Multi-GNSS Signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2022,60:1-13

[16] Pan H, Jiao S, Xu T, et al. Investigation of Tidal Evolution In The Bohai Sea Using The Combination of Satellite Altimeter Records and Numerical Models[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2022,279:108140

[17] Wei G, Chen K, Ji R. Improving Estimates of Ocean Tide Loading Displacements with Multi-GNSS:A Case Study of Hong Kong[J]. GPS Solutions,2022,26(1):25

[18] Abbaszadeh M, Clarkf P J, Pennt N T. Benefits of Combining GPS and Glonass for Measuring Ocean Tide Loading Displacement[J]. Journal of Geodesy,2020,94(7):63

[19] Geng J, Pan Y, Li X, et al. Noise Characteristics of High-rate Multi-GNSS for Subdaily Crustal Deformation Monitoring[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2018,123(2):1987-2002

[20] Carrere L, Lyard F, Cancet M, et al. A New Barotropic Tide Model for Global Ocean: Fes2022[C]//2022 Ocean Surface Topography Science Team Meeting,2022:43

[21] Li X, Zhang X, Ren X, et al. Precise Positioning with Current Multi-constellation Global Navigation Satellite Systems:GPS, Glonass, Galileo And Bei Dou[J]. Scientific Reports,2015,5(1):8328

[22] Pan L, Gao X, Hu J, et al. Performance Assessment of Real-time Multi-GNSS Integrated PPP with Uncombined and Ionospheric-free Combined Observables[J]. Advances in Space Research,2021,67(1):234-252

[23] Foreman M G G, Henry R F. The Harmonic Analysis of Tidal Model Time Series[J]. Advances in Water Resources, 1989,12(3):109-120