引文格式：郜士彬,陈科,袁伟,等. 高阶重力场模型的高程异常差值改正方法研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 117-121. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.024

高阶重力场模型的高程异常差值改正方法研究

郜士彬[1]，陈　科[1]，袁　伟[1]，汪诗奇[1]，李曦凌[1]
（1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南 昆明 650000）

摘　要：通过水准仪测量获取区域高程控制网点正常高的方式，精度高但耗时费力。首先利用EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2四种高阶全球重力场模型获取高程异常，再利用少量GNSS水准控制点获取真实高程异常，最后采用平均差值改正短波值方法快速获取高程异常。结合滇中引水工程307个GNSS水准控制点成果，以验证东西方向10 km、20 km、40 km和80 km距离范围内的高程异常改正效果。结果表明，在东西方向40 km内采用4个和2个GNSS水准控制点改正4种模型的高程异常中误差在±5 cm以内，平均中误差改正率接近50%，其中XGM2019e_2159模型整体上更符合似大地水准面。该方法可提高小区域范围内高程异常获取的精度和效率。

关键词：高程异常；重力场模型；正常高；平均差值改正
中图分类号：P223　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0117-05

Research on the Correction Method of Elevation Anomaly Difference for High-order Gravity Field Models

GAO Shibin[1], CHEN Ke[1], YUAN Wei[1], WANG Shiqi[1], LI Xiling[1]
(1. Kunming Engineering Corporation Limited of PowerChina, Kunming 650000, China)

Abstract: The previous regional grade elevation control network was measured by level to obtain the normal height of elevation control points, which is highly accurate but time-consuming and laborious. We used EGM2008, EIGEN-6C4, XGM2019e_2159 and SGG-UGM-2 four high-order global gravity field models to obtain the elevation anomaly at first. And then, we used a few GNSS level control points to obtain the real elevation anomaly. Finally, we proposed a method of correcting short wave value by mean difference to obtain the elevation anomaly quickly. We verified the correction effect of elevation anomalies in the distance range of 10 km, 20 km, 40 km and 80 km in the east-west direction respectively. The results show that the average error correction rate is nearly 50%, and the XGM2019e_2159 model is more consistent with the quasigeoid in the whole. This method can improve the accuracy and efficiency of elevation anomaly acquisition in a small area.

Key words: elevation anomaly, gravity field model, normal height, mean difference correction

高分辨率重力场模型由国际全球地球模型中心（ICGEM）发布，是国际大地测量协会（IAG）下国际重力场服务协调的5项服务之一。ICGEM主要收集和存储全球现有的全球重力场模型，提供全球重力场模型的网页界面访问和基于网络的随时间变化的重力场差异可视化模拟，用于计算不同重力场模型。截至2023年4月1日，共收集了178种静态模型，包括单一重力场模型和组合重力场模型。一般通过卫星重力数据、卫星测高数据、地面重力数据、机载重力数据、船载重力数据和地形模型的重力信号组合获得高分辨率的重力场模型[1]。2007年美国大地测量局开启国家空间参考系统现代化工程，新的参考框架主要通过全球导航卫星系统（GNSS）获取点位的平面坐标，完全通过重力测量建立大地水准面模型[2]。2017—2019年IAG组织的科罗拉多大地水准面建模实验和中国2020年珠峰高程测量两项典型案例研究结果表明，在平坦地区和一般山区，重力大地水准面模型最高能达到1 cm精度，即使在珠穆朗玛峰这样的特大山区，也可达2~3 cm的精度[3]。党亚民[3]等预估了EGM2008和XGM2019e_2159等高阶重力场模型的大地水准面误差，在重力数据充足区域为4~6 cm；章传银[4]等指出EGM2008模型高程异常在中国大陆整体可达20 cm精度，与全球精度相当；根据Liang W[5]等的验证结果，EGM2008、EIGEN-6C4和SGG-UGM-1在美国具有一致的精度，而GOCE相关模型（如EIGEN-6C4和SGG-UGM-1）在中国具有更好的性能。随着重力场模型长波到中波信号精度的提高，且由地面重力、卫星测高、机载重力测量或残差地形模型（RTM）正演模拟计算的填充重力异常

收稿日期：2023-07-15。
第一作者简介：郜士彬（1989—），硕士研究生，工程师，主要从事工程测量、3S技术、三维激光扫描与水下多波束技术、点云数据处理等方面的工作，E-mail：595327824@qq.com。

构建的地表重力异常数据提供了高精度的短波长信息，使得高分辨率重力场模型可用于高精度大地水准面的测定。高分辨率重力场模型可获取地球任意点位的高程异常值[6-7]，使通过GNSS大地高快速获取高精度正常高成为可能。本文首先利用EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2四种高分辨率全球重力场模型获取高程异常值；再与GNSS水准控制点方法获取的真实高程异常值进行对比分析；最后提出了一种平均差值改正方法。结合滇中引水工程307个三等水准点成果，本文分别验证了东西方向10 km、20 km、40 km和80 km距离范围内的高程异常值改正效果以及在少量高程控制点情况下，大地高快速转换正常高的可能[8-11]。

1 技术原理和方法

1.1 高分辨率重力场模型

EGM2008模型是目前最常用的重力场模型之一，由5′×5′重力异常数据集构建，主要包含地面观测、卫星测高、RTM正演模拟的重力异常数据以及波恩大学大地测量学和地理信息研究所的GRACE标准方程——GRACE03S纯卫星模型，不包含任何GOCE测量成果[4]。EIGEN-6C4模型结合了GOCE观测数据和激光地球动力学卫星观测数据，包含的陆地区域地表重力异常取自EGM2008[6]。XGM2019e_2159是一个组合的全球重力场模型，由高达5 399阶次的球体谐波表示，可达到2'的空间分辨率，包括卫星模型GOCO06s数据和较短波长的地面重力数据，其中地面数据包括由NGA提供的与XGM2016相同的陆地和海洋重力异常以及陆地上的EARTH2014地形重力信息。XGM2019e_2159模型被认为在全球范围内更加一致，且独立于现有的高分辨率全球模型，尤其在海洋上空表现出增强的性能[7]。SGG-UGM-2模型是SGG-UGM-1的升级模型，是在EGM2008的基础上利用GOCE数据改进计算的高阶模型[5]。4种高分辨率重力场模型基本信息见表1。

表1 高分辨率重力场模型

模型名称	最高阶次	发布时间	参考数据源
EGM2008	2 190	2008	A、G、S（Grace）
EIGEN-6C4	2 190	2014	A、G、S（Goce）、S（Grace）、S（Lageos）
XGM2019e_2159	2 190	2019	A、G、S（GOCO06s）、T
SGG-UGM-2	2 159	2020	A、EGM2008、S（Goce）、S（Grace）

注：A为测高重力数据；S为卫星重力数据；G为地面重力数据；T为地形重力数据。

1.2 正常高获取

目前主要通过等级水准测量和等级GNSS控制网静态联测的方式获取区域控制点正常高，需要大量外业工作。随着全球导航定位系统的快速发展，尤其是我国北斗三号卫星的发展应用，使得地基增强网络结合GNSS技术获取准确的大地高成为现实[12]。正常高的计算公式为：

$$h = H - \zeta_{\mathrm{GNSS}} \tag{1}$$

式中，H为GNSS大地高；ζ_{GNSS}为高程异常，单位为m。

如何获取准确的高程异常是快速获取正常高的关键。简化重力场模型与似大地水准面的关系，将高程异常分解为中长波值和短波值，以EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2模型获取的高程异常作为中长波值；短波值与实际地形相关，区域地形测量一般范围较小，拟通过已知控制点的高程异常减去中长波值作为区域高程异常的短波值，即

$$\zeta = \zeta_{\text{中长波值}} + \zeta_{\text{短波值}} \tag{2}$$

1.3 平均差值改正方法

移去—恢复算法的主要思想为：移除高程异常中变化较小的中长波分量，再对剩余值进行拟合并通过差值方法计算得到待求点数值，最后在待定点上恢复中长波分量[13-15]。针对普通工程测量项目范围较小和测区高等级高程控制点较少，无法很好开展多项式拟合、曲面拟合和多面函数拟合方法的实际情况，借鉴该思路，本文采用极少个高程控制点高程异常平均差值来求解区域内待求点的短波值。首先通过EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2模型获取高程异常$\zeta_{\text{重力}}$，该值为高程异常的中长波段部分；再以测区东西边界位置已知高程控制点高程异常与$\zeta_{\text{重力}}$的平均差值作为短波改正部分，以提高小区域高程异常精度。高程异常平均差值改正方法的计算公式为：

$$\begin{cases} \Delta\zeta = \zeta_{\mathrm{GNSS}} - \zeta_{\text{重力}} \\ \Delta\zeta_{\text{补偿}} = -\sum_{i=1}^{n} \Delta\zeta_i / n \\ \zeta = \zeta_{\text{重力}} + \Delta\zeta_{\text{补偿}} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$\zeta_{\text{重力}}$为重力场模型计算的高程异常（中长波值）；i为GNSS水准控制点数量；$\Delta\zeta_i$为高程异常差值；$\Delta\zeta$为区域高程异常补偿值（短波值）；ζ为改正后的高程异常，单位为m。

将4种重力场模型的高程异常与GNSS水准高程异常差值进行曲线拟合，得到短波值在东西方向的变化

趋势（图1），其中EGM2008模型最不稳定，其他3种模型大范围呈连续曲线趋势，XGM2019e_2159模型符合性最好，差值基本在±5 cm之内。将拟合后的高程异常短波值局部放大发现，经过曲线拟合后的高程异常短波值在局部区域呈现明显的直线趋势，为平均差值改正方法提供了基础。

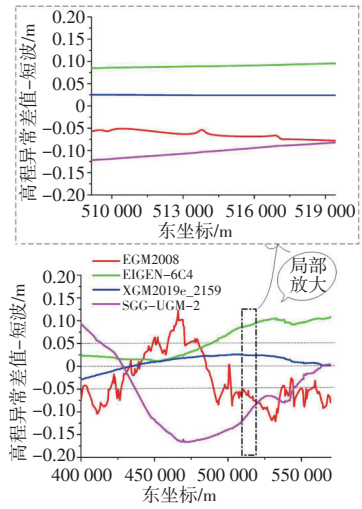


图1　不同重力场模型短波值变化趋势

本文分别采用4个、2个和1个GNSS水准控制点参与高程异常补偿值解算，点位布设见图2，黑色圆点为已知高程控制点，红色三角为待求高程点。按照东西方向距离的不同，验证10 km、20 km、40 km和80 km范围内平均差值改正法的效果。首先利用国际重力场服务网站的计算服务获取任意点高程异常中长波值；再结合GNSS水准控制点计算的高程异常，代入式（3）计算得到4个、2个和1个GNSS水准控制点的高程异常短波值；最后利用平均差值方法获取区域高程异常短波值，并将短波值补偿给待求高程点的中长波值，从而快速得到该待求高程点的高程异常。

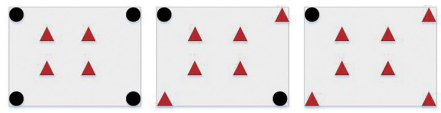


图2　高程异常补偿值解算方案

2　计算结果与分析

滇中引水二期控制网监测项目涉及楚雄、昆明两个州市，实测307个二等GNSS控制点和三等水准点成果，控制点东西横跨190多km，呈条带状，最低高程为1 760 m，最高高程为2 530 m，平均高程为2 035 m，属于典型的山区地形。

2.1　整体情况分析

本文对307个GNSS水准控制点进行整体分析，以GNSS水准控制点获得的高程异常为真值，与EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2模型获取的高程异常值进行对比。结果表明（图3），高程异常值主要分布在-35~-31 m之间；高程异常在东西方向上变化更规律和明显。

结合307个GNSS水准控制点获取的高程异常，对4种高分辨率重力场模型获取的高程异常进行数据分析，结果见表2。

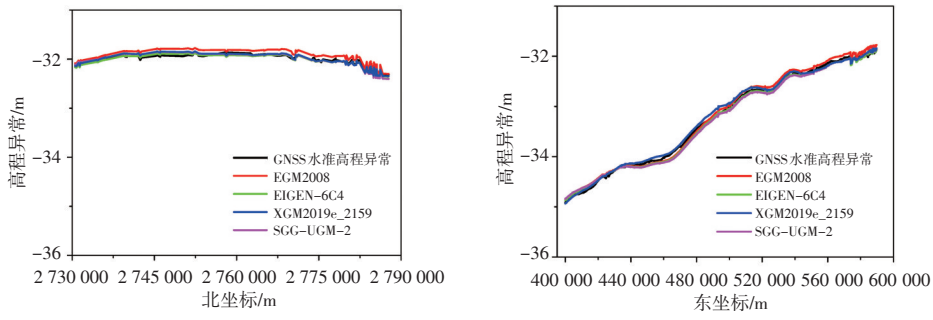


图3　不同重力场模型高程异常在的东/北方向上的变化趋势

表2　4种重力场模型与GNSS水准点高程异常差值分析统计表/m

模型	最大差值	最小差值	平均差值	中误差
EGM2008	0.131	-0.150	-0.046	0.092
EIGEN-6C4	0.154	-0.085	0.021	0.059
XGM2019e_2159	0.072	-0.152	0.029	0.063
SGG-UGM-2	0.171	-0.104	0.022	0.073

2.2　平均差值改正实验

由于高程异常在东西方向上的变化更规律，本文将控制点东西方向的距离划分为10 km、20 km、40 km和80 km；为消除偶然性、提高实验的可靠性，随机选取10 km/10组数据，20 km/5组数据，40 km/3组数据，80 km/2组数据。参与计算高程异常补偿值的高程控制点分别为4个、2个和1个，其他已知GNSS水准控制点作为检验点。

1）10 km/10组数据实验。由图4可知，4个和2个GNSS水准控制点进行高程异常差值平均改正，4种模型的高程异常中误差均在0.05 m以内；1个GNSS水准控制点进行高程异常改正时，4种模型有超出0.05 m的部分；在未改正的情况下，XGM2019e_2159模型的高程异常中误差最小。

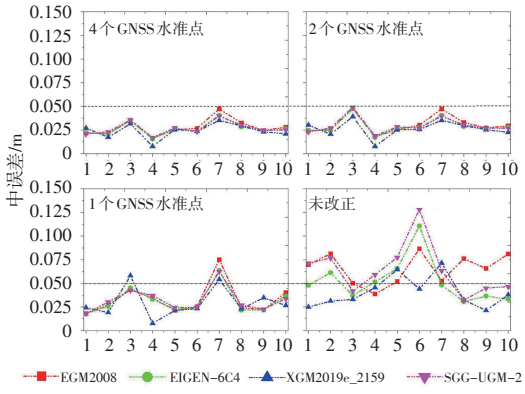


图4 10 km/10组数据4种重力场模型中误差改正效果图

2）20 km/5组数据实验。由图5可知，4个和2个GNSS水准控制点进行高程异常差值平均改正，4种模型的高程异常中误差均在0.050 m以内；1个GNSS水准控制点进行高程异常改正时，EIGEN-6C4和SGG-UGM-2模型的改正效果更好；在未改正的情况下，XGM2019e_2159模型的高程异常中误差最小。

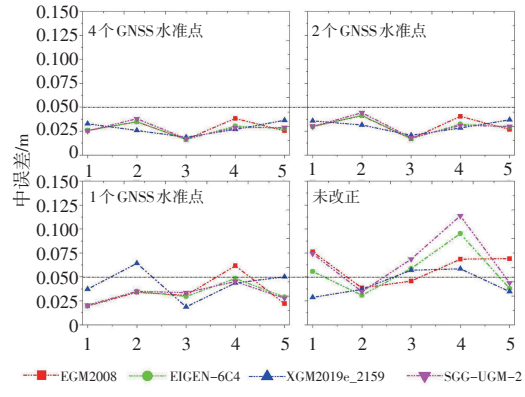


图5 20 km/5组数据4种重力场模型中误差改正效果图

3）40 km/3组数据实验。由图6可知，4个和2个GNSS水准控制点进行高程异常差值平均改正，4种模型的高程异常中误差均在0.05 m以内；1个GNSS水准控制点进行高程异常改正时，EGM2008和XGM2019e_2159模型的改正效果更好；在未改正的情况下，XGM2019e_2159模型的高程异常中误差最小。

4）80 km/2组数据实验。由图7可知，模型改正效果反而降低；在未改正的情况下，XGM2019e_2159模型的高程异常中误差最小。

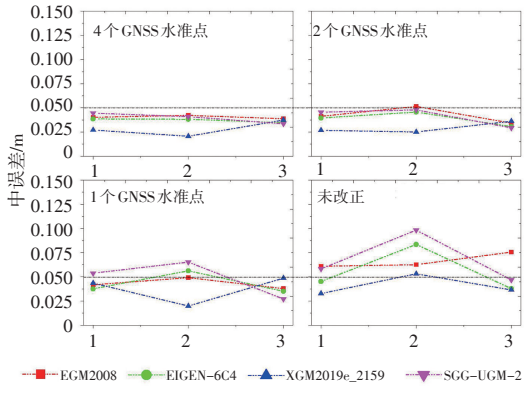


图6 40 km/3组数据4种重力场模型中误差改正效果图

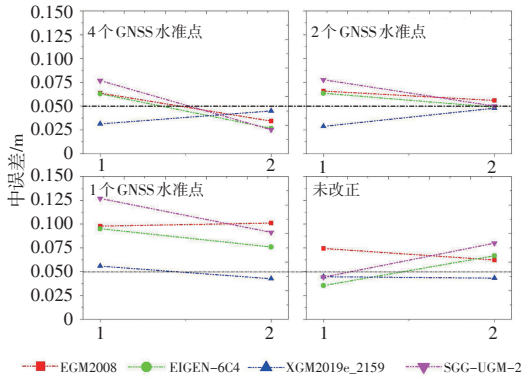


图7 80 km/2组数据4种重力场模型中误差改正效果图

从10 km/10组数据、20 km/5组数据高程异常平均中误差改正效果来看（表3），4种模型在4个、2个和1个GNSS水准控制点改正下，平均中误差均小于0.040 m，平均中误差改正率接近50%；由40 km/3组数据的改正效果来看，平均中误差均小于0.050 m，平均中误差改正率接近30%；80 km/2组数据的改正效果不明显；XGM2019e_2159模型的高程异常平均中误

表3 4个重力场模型中误差改正统计表

模型	改正点数量/个	10 km平均中误差/m	10 km中误差改正率/%	20 km平均中误差/m	20 km中误差改正率/%	40 km平均中误差/m	40 km中误差改正率/%	80 km平均中误差/m	80 km中误差改正率/%
EGM2008	4	0.028	57	0.028	53	0.040	39	0.049	28
	2	0.031	52	0.031	48	0.042	36	0.061	10
	1	0.033	49	0.034	43	0.043	35	0.099	−46
	未改正	0.065	–	0.060	–	0.066	–	0.068	–
EIGEN-6C4	4	0.026	50	0.027	52	0.037	34	0.045	12
	2	0.029	44	0.030	46	0.039	30	0.056	−10
	1	0.031	40	0.032	43	0.043	23	0.086	−69
	未改正	0.052	–	0.056	–	0.056	–	0.051	–
XGM2019e_2159	4	0.024	47	0.028	35	0.028	32	0.038	14
	2	0.026	42	0.031	28	0.029	29	0.038	14
	1	0.029	36	0.043	9	0.037	10	0.049	−11
	未改正	0.045	–	0.043	–	0.041	–	0.044	–
SGG-UGM-2	4	0.027	58	0.028	58	0.040	41	0.051	18
	2	0.030	53	0.031	54	0.041	40	0.064	−3
	1	0.032	50	0.032	52	0.049	28	0.109	−76
	未改正	0.064	–	0.067	–	0.068	–	0.062	–

差改正前均小于0.050 m，该模型改正前与真实高程异常差值较小，平均中误差改正率较小。

3 结 语

本文研究了利用EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e_2159和SGG-UGM-2四种全球重力场模型获取高程异常的方法，并通过4个和2个GNSS水准控制点高程异常平均差值改正方法分别验证了东西方向10 km、20 km、40 km和80 km距离范围内的高程异常值改正效果。结合滇中引水工程307个GNSS水准点成果，得到以下结论：

1）4种高分辨重力场模型均可直接获得地球任一点高程异常。高程异常在东西方向上的变化更规律和明显。在文中所述地区未改正前高程异常中误差可达±10 cm以内。

2）本文提出的平均差值改正方法在东西方向10 km、20 km和40 km距离范围内，利用4个和2个GNSS水准控制点改正4种重力场模型的高程异常中误差在±5 cm以内，平均改正率接近50%。该方法可提高小区域范围内高程异常获取精度和效率。

3）XGM2019e_2159模型在整体上更符合似大地水准面，在缺少高程控制点的区域可优先考虑使用该重力场模型获取高程异常。

4）利用GNSS水准点平均差值改正高分辨率重力场模型获取高程异常的方法，可以满足小范围大比例尺测图的高程精度要求，配合无人机载雷达设备作业，可优化传统测图的作业模式。

参考文献

[1] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. Correction to “the Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)”[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(5):2 633

[2] Wang Y M, Li X P, Ahlgren K, et al. Colorado Geoid Modeling at the US National Geodetic Survey[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(10):93-105

[3] 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10):1 576-1 586

[4] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM 2008地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4):283-289

[5] Liang W, Li J C, Xu X Y, et al. A High-resolution Earth’s Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry and EGM2008[J]. Engineering, 2020(8): 860-878

[6] Frste C, Bruinsma S, Abrikosov O, et al. EIGEN-6C4: The Latest Combined Global Gravity Field Model Including GOCE Data up to Degree and Order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014

[7] Zingerle P, Pail R, Gruber T, et al. The Combined Global Gravity Field Model XGM2019e[J]. Journal of Geodesy: Continuation of Bulletin Géodésique and Manuscripta Geodaetica, 2020, 94(7):419-432

[8] 梁永, 冯剑秋, 张冠军, 等. 利用重力场模型确定GNSS点位正常高的多种方法比较[J]. 测绘通报, 2022(增刊2):34-39

[9] 章传银, 马旭, 章磊, 等. 基于GNSS水准和重力场误差特性的大地水准面精度评估方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(1):12-17

[10] 李明飞, 吴军超, 秦川. 基于移去—恢复法的局部似大地水准面精化模型对比研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(9):952-956

[11] 章传银, 蒋涛, 柯宝贵, 等. 高程系统定义分析与高精度GNSS代替水准算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(8):945-951

[12] 党亚民, 许长辉, 王虎, 等. 国家北斗动态基准服务产品精度分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(6):23-28

[13] 张伟伟. 基于移去—恢复的Shepard插值在似大地水准面构建中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(12):233-235

[14] 程建华, 黄孟远, 葛靖宇, 等. 基于改进“移去—恢复”算法的海底地形构建方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(3):377-384

[15] 赵炳杰, 杨光亮, 黎哲君. 移去—恢复法校准重力异常场及其应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(4):361-365

（上接第104页）

[12] Nacer N, Ding Y, Sunil B, et al. Assessment of Galileo High Accuracy Service (HAS) Test Signals and Preliminary Positioning Performance[J]. GPS Solutions, 2023, 27(2):1-13

[13] Prol F S, Kirkko-Jaakkola M, Horst O. et al. Enabling the Galileo High Accuracy Service with Open-source Software: Integration of HASlib and RTKLIB[J]. GPS Solutions, 2024, 28(2):1-13

[14] Peiyuan Z, Guorui X, Lan D. Initial Performance Assessment of Galileo High Accuracy Service with Software-defined Receiver[J]. GPS Solutions, 2023, 28(1):1-14

[15] 季锐, 刘长建, 王敏, 等. Galileo 高精度定位服务初始服务性能评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(1):21-26

[16] Mao F, Lou Y, Geng C, et al. Evaluation of Timing and Time Transfer with PPP Using Galileo High Accuracy Service[J]. Measurement, 2024, 22(6):114-121

[17] Li B F, Ge H B, Bu Y H, et al. Comprehensive Assessment of Real-time Precise Products from IGS Analysis Centers[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1):1-17