引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.030

海潮模型在北斗精密单点定位中的影响分析

冯建强[1]，边　超[1]，王　乾[2]
（1. 南水北调中线信息科技有限公司，北京 100038；2. 山东黄金集团蓬莱矿业有限公司，山东 烟台 265621）

摘　要：针对海潮负荷影响全球卫星导航系统高精度导航定位的问题，借助北斗卫星导航系统（BDS）观测数据，对比分析了海潮模型在北斗二号（BDS-2）、北斗三号（BDS-3）、北斗二号和三号（BDS-2+BDS-3）精密单点定位（PPP）中的影响。结果表明，海潮模型使BDS-2 PPP在N、E和U方向精度分别提升20.18%、20.20%、25.40%，使BDS-3 PPP在N、E和U方向精度分别提升14.81%、14.22%、15.30%，使BDS-2+BDS-3 PPP在N、E和U方向精度分别提升9.13%、9.41%、10.01%。

关键词：海潮负荷；BDS；PPP；三维坐标
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0124-04

Influence Analysis of Ocean Tide Model in BDS Precision Point Positioning

FENG Jianqiang[1], BIAN Chao[1], WANG Qian[2]
(1. South to North Water Transfer Middle Route Information Technology Co., Ltd., Beijing 100038, China;
2. Shandong Gold Group Penglai Mining Co., Ltd., Yantai 265621, China)

Abstract: In view of the impact of ocean tide load on the high-precision navigation and positioning of global navigation satellite system, with the help of observation data of Beidou navigation satellite system(BDS), we compared and analyzed the influence of ocean tide model on precision point positioning(PPP) of BDS-2, BDS-3, BDS-2+BDS-3. The experimental results show that the ocean tide model can improve the accuracy of BDS-2, BDS-3 and BDS-2+BDS-3 PPP. The positioning accuracy of BDS-2 PPP in N, E and U directions are increased by 20.18%, 20.20% and 25.40% respectively, BDS-3 increased by 14.81%, 14.22% and 15.30%, BDS-2+BDS-3 increased by 9.13%, 9.41% and 10.01%.

Key words: ocean tide load, BDS, PPP, 3D coordinate

海潮负荷是指海水质量周期性地作用于地球表面，使地球表面发生弹性变化[1]。研究表明，海潮负荷会对全球卫星导航系统（GNSS）的导航与定位产生厘米级影响，且沿海地区的影响是内陆地区的4~5倍[2]。精密单点定位（PPP）技术具备无需基准站、不受距离限制、高精度和低成本的优点，受到GNSS用户青睐和支持[3-5]。王俊杰[6]等依托福建GNSS对闽海潮负荷位移进行了研究，结果表明海潮模型差异主要影响海潮负荷垂直分量，其影响数值是水平分量的3倍左右；魏国光[7]等对香港地区GNSS观测数据进行静态PPP解算，获取PPP坐标时间序列，求取分潮负荷位移参数，结果表明不同测站PPP反演结果存在差异性，反演负荷位移参数在垂直分量上优于全球海潮模型；赵红[8]等利用改进的动态PPP技术建立了香港地区海潮负荷位移模型，其精度优于静态PPP构建的海潮负荷位移模型，有效提高了海潮模型的适应性。2020年北斗卫星导航系统（BDS）正式组网完成，在导航、定位和授时方面均取得快速发展和应用[9-10]。目前针对海潮模型在BDS PPP中的研究还较少，本文基于国际GNSS服务组织（IGS）分析中心提供的观测数据，对比分析了海潮模型在BDS-2、BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP中的影响。

1　海潮负荷的数学模型

海潮负荷的数学模型采用负荷格林函数褶积积分法表达，由海潮瞬时潮高和格林函数褶积积分求取，即[11]

$$\begin{cases} L_{\mathrm{u}}(\varphi,\lambda,t)=\rho_{\omega}\iint\limits_{\Omega}H_i(\varphi',\lambda',t)U(\psi)\mathrm{d}\Omega \\ L_{\mathrm{w}}(\varphi,\lambda,t)=\rho_{\omega}\iint\limits_{\Omega}H_i(\varphi',\lambda',t)V(\psi)\sin A\mathrm{d}\Omega \\ L_{\mathrm{s}}(\varphi,\lambda,t)=\rho_{\omega}\iint\limits_{\Omega}H_i(\varphi',\lambda',t)V(\psi)\cos A\mathrm{d}\Omega \end{cases} \tag{1}$$

式中，L_{u}、L_{w}、L_{s}分别为海潮负荷引起的站点径

收稿日期：2022-05-24；修回日期：2022-07-04。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR201807060327）。
第一作者简介：冯建强（1987—），工程师，注册测绘师，从事大地测量与数据处理研究工作，E-mail：1550629612@163.com。

向、西向和南向位移；ρ_ω为海水密度；φ、λ为计算点球坐标；φ'、λ'为负荷点球坐标；t为计算天文幅角初相开始时间；ψ为计算点到负荷点的球面角距；A为计算点到负荷点的球面方位角；$H_i(\varphi',\lambda',t)$为瞬时潮高；$U(\psi)$和$V(\psi)$分别为垂直和水平方向上的格林函数。

$$\begin{cases} U(\psi)=\dfrac{kR}{g}\sum\limits_{n=0}^{\infty}h'_nP_n(\cos\psi) \\ V(\psi)=\dfrac{kR}{g}\sum\limits_{n=0}^{\infty}l'_n\dfrac{\partial P_n(\cos\psi)}{\partial\psi} \end{cases} \tag{2}$$

式中，k、g分别为引力常数和重力常数；R为地球半径；h'_n、l'_n为n阶负荷勒夫数；$P_n(\cos\psi)$为勒夫让德函数。

测站与负荷点的球坐标有以下关系[12]：

$$\cos(\psi)=\sin\varphi\sin\varphi'+\cos\varphi\cos\varphi'\cos(\lambda-\lambda') \tag{3}$$

瞬时潮高一般可展开为若干调和分潮潮高的总和，计算公式为：

$$H(\varphi',\lambda',t)=\sum_{k=1}^{N}\xi_k(\varphi',\lambda')\cos[\omega_kt+x_k-\delta_k] \tag{4}$$

式中，N为叠加潮波数；ω_k为各分潮角频率；x_k为各分潮天文幅角；ξ_k、δ_k分别为各分潮坐标分量的振幅和相位。

一般在计算过程中，海潮负荷只考虑4个半日分潮、4个全日分潮、半月波、月波和半年波11个主要分潮的影响。

2　数据来源与方案设计

2.1　数据来源

为对比分析海潮模型在BDS-2、BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP中的定性、定量影响，本文选取亚太地区具有BDS观测数据的IGS观测数据，借助Bernese软件进行PPP处理，卫星星历均采用事后精密星历。按照测站所在位置与海洋距离的远近，将测站划分为沿海、内陆两种，11个测站属于沿海地区、19个测站属于内陆地区。

2.2　方案设计与处理策略

本文设计了6组对照实验，参数配置遵循控制变量法，其中方案1和方案2（BDS-2）、方案3和方案4（BDS-3）、方案5和方案6（BDS-2+BDS-3）分别为对照实验。方案1~6静态PPP解算的卫星截止高度角均设置为10°，对流层延迟采用Saastamoinen模型+GMF映射函数进行削弱改正，电离层延迟采用双频观测值消除电离层延迟影响，卫星星历采用IGS数据中心公布的事后精密星历，天线相位采用IGS14模型进行改正，固体潮采用IERS模型进行改正；方案2、方案4和方案6海潮模型采用FES2004模型进行改正，方案1、方案3和方案5不进行改正。

3　结果分析

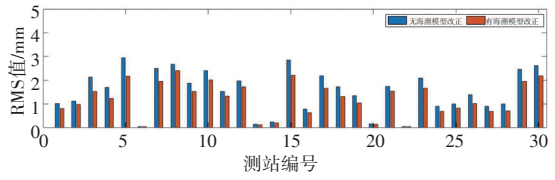
本文按照PPP处理参数配置表进行PPP解算，将2020年年积日200~260每天PPP结果分别与以IGS数据中心提供的测站三维坐标进行对比分析，并将两种模式解算结果与IGS测站差值的互差作为海潮负荷位移量；同时进一步统计三维坐标互差的均方根（RMS），用以评价外符合精度。

3.1　海潮模型对BDS-2 PPP的影响分析

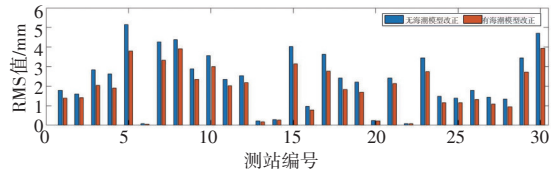
根据方案1和方案2，统计两种模式解算2020年积日200~260的测站结果与IGS测站差值的互差（表1）和RMS值（图1），可以看出，海潮模型对BDS-2 PPP在U方向产生的位移大于N、E方向的位移量，其中ABMF站在U方向的位移为厘米级，其原因可能是ABMF站位于海洋地区，受海潮影响较大；海潮负荷模型对BDS-2 PPP在N、E和U方向产生的位移均值为2.60 mm、3.02 mm、5.51 mm；各测站BDS-2 PPP均在U方向误差最大，5个测站在海潮模型改正前后定位结果均优于1 mm，其原因是接收卫星个数较多、数据观测质量较好、定位精度较高；加入海潮模型后，各测站在N、E和U方向定位误差均有所改善，但改善量有所区别，可能是由不同站点所处位置不同引起的。沿海和内陆地区测站海潮负荷模型均对PPP

表1　海潮模型对BDS-2 PPP的位移量/mm

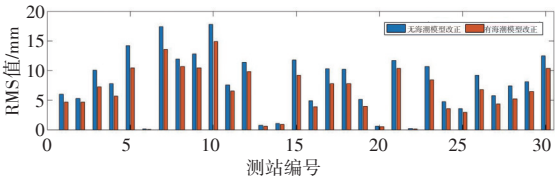
测站名	ΔN	ΔE	ΔU	测站名	ΔN	ΔE	ΔU
ABMF	4.74	3.99	10.57	GRAB	4.43	3.60	6.46
AIRA	2.38	3.98	5.15	JFNG	3.31	4.21	5.52
AUT0	4.49	3.98	6.98	KIRU	1.34	4.00	4.68
BIK0	1.35	1.20	2.90	KZN2	1.83	2.54	2.80
BRST	2.47	2.44	3.73	M0SE	1.16	3.11	6.42
BRUX	2.61	3.16	6.53	MAR7	2.38	3.59	3.59
CCJ2	3.89	2.81	6.66	MATG	4.86	1.68	4.51
CHOF	2.81	4.45	5.40	NKLG	1.60	2.66	5.60
DAE2	2.17	3.40	5.96	OBE4	1.26	2.80	4.95
DRAO	1.14	1.97	3.80	WROC	1.29	1.33	3.39
DUND	4.37	2.64	8.27	ZIM3	1.97	3.86	6.70
DYNG	2.12	3.98	5.36	WUH2	2.03	1.97	6.04
GMSD	2.17	2.74	6.27	USN9	3.43	1.99	6.51
GOP7	3.06	4.03	5.94	SGOC	2.38	3.48	6.26
GRA1	3.80	3.28	6.42	NKLG	1.32	1.73	2.04



a N方向



b E方向



c U方向

图1 BDS-2 PPP三维坐标残差RMS值

注：测站编号依次对应AIRA、BIK0、BRUX、BRST、CHOF、AUT0、ABMF、DAE2、DUND、DYNG、GMSD、GOP7、DRAO、CCJ2、GRA1、GRAB、JFNG、KIRU、KZN2、NKLG、M0SE、WROC、MAR7、MATG、OBE4、ZIM3、WUH2、USN9、SGOC、NKLG。

结果产生一定影响，总体而言，海潮模型使BDS-2 PPP结果在N、E和U方向精度分别提升20.18%、20.20%、25.40%，U方向精度提升最显著，这与参考文献[13]的研究结果相吻合。

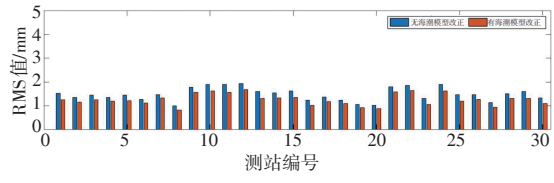
3.2 海潮模型对BDS-3 PPP的影响分析

根据方案3和方案4，统计两种模式解算2020年积日200~260的测站结果与IGS测站差值的互差（表2）和RMS值（图2），可以看出，海潮模型对BDS-3 PPP

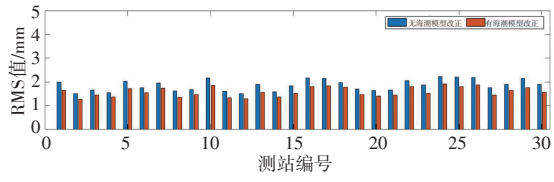
表2 海潮模型对BDS-3 PPP的位移量/mm

测站名	ΔN	ΔE	ΔU	测站名	ΔN	ΔE	ΔU
ABMF	4.18	4.70	6.33	GRAB	3.04	2.19	6.47
AIRA	4.87	4.78	5.80	JFNG	3.22	3.21	3.23
AUT0	2.89	2.88	4.39	KIRU	2.41	2.04	3.18
BIK0	1.82	1.88	3.22	KZN2	2.16	1.93	4.70
BRST	2.61	2.26	5.04	M0SE	1.98	1.76	6.76
BRUX	1.71	4.48	5.04	MAR7	3.90	2.65	6.06
CCJ2	2.22	2.72	5.65	MATG	2.28	3.75	5.59
CHOF	3.73	3.12	3.40	NKLG	2.38	3.31	3.72
DAE2	1.20	4.95	5.52	OBE4	4.35	1.26	6.94
DRAO	2.86	2.65	4.56	WROC	4.52	3.54	6.83
DUND	3.25	4.35	8.88	ZIM3	3.01	1.52	6.32
DYNG	3.47	1.82	5.44	WUH2	1.16	2.38	4.40
GMSD	1.94	3.76	6.03	USN9	3.64	1.01	4.07
GOP7	2.82	2.89	5.38	SGOC	2.66	3.77	4.41
GRA1	1.25	3.34	6.61	NKLG	4.10	2.67	5.20

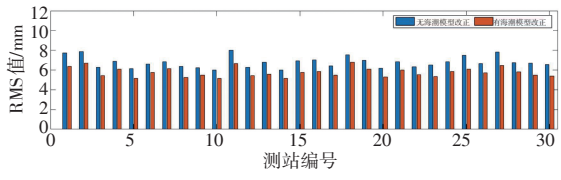
在N、E和U方向产生的位移量均为毫米级，在N、E和U方向产生最大位移量分别为4.87 mm、4.95 mm和8.88 mm，均值分别为2.85 mm、3.92 mm和5.31 mm；各测站BDS-3 PPP均在U方向误差最大，在N、E和U方向最佳定位RMS值分别为1.10 mm、1.50 mm、6.02 mm，海潮模型改正后，在N、E和U方向最佳定位RMS值分别为0.83 mm、1.27 mm、5.15 mm；总体而言，海潮模型使BDS-3 PPP结果在N、E和U方向精度分别提升14.81%、14.22%、15.30%，这与参考文献[14]的研究结果一致。



a N方向



b E方向



c U方向

图2 BDS-3 PPP三维坐标残差RMS值

注：测站编号同图1。

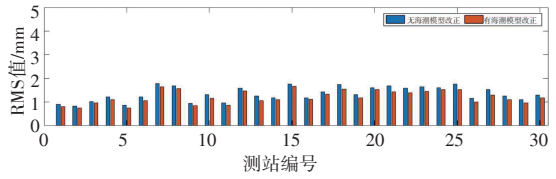
3.3 海潮模型对BDS-2+BDS-3 PPP的影响分析

根据方案5和方案6，统计两种模式解算2020年积日200~260的测站结果与IGS测站差值的互差（表3）和RMS值（图3），可以看出，海潮模型对BDS-2+BDS-3 PPP在N、E和U方向产生的位移量均为毫米级，在N、E和U方向产生最大位移量分别为3.49 mm、3.67 mm和5.91 mm，均值分别为2.27 mm、2.22 mm和4.10 mm；与BDS-2、BDS-3 PPP相比，BDS-2+BDS-3 PPP结果精度明显提高，海潮模型改正前BDS-2+BDS-3 PPP在N、E和U方向的最佳定位RMS值分别为0.81 mm、0.52 mm、3.63 mm，改正后的最佳定位RMS值分别为0.74 mm、0.46 mm、3.10 mm；总体而言，海潮模型使BDS-2+BDS-3 PPP结果在N、E和U方向精度分别提升9.13%、9.41%、10.01%，这与参考文献[13]的研究结果吻合。与BDS-2、BDS-3 PPP相比，海潮模型对BDS-2+BDS-3 PPP精度提升量

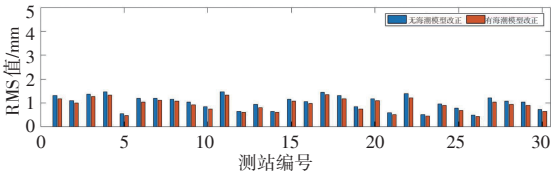
较小，且在三维方向提升精度相当，其原因可能是BDS-2+BDS-3 PPP精度较高导致误差改善量受限。

表3　海潮模型对BDS-2+BDS-3 PPP的位移量/mm

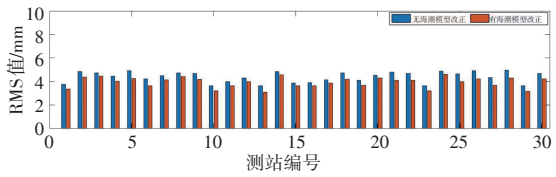
测站名	ΔN	ΔE	ΔU	测站名	ΔN	ΔE	ΔU
ABMF	2.36	3.08	4.13	GRAB	2.38	1.06	5.68
AIRA	2.11	2.47	3.96	JFNG	3.10	2.68	4.04
AUT0	1.77	2.47	4.81	KIRU	2.59	3.67	4.52
BIK0	2.43	1.55	2.90	KZN2	1.31	2.23	2.66
BRST	1.94	1.62	3.04	M0SE	1.47	2.77	3.85
BRUX	3.45	2.07	5.89	MAR7	3.42	2.22	3.29
CCJ2	1.89	1.86	3.34	MATG	2.32	2.21	4.33
CHOF	2.12	1.57	3.26	NKLG	3.49	2.19	5.00
DAE2	1.66	2.40	3.61	OBE4	3.32	1.87	3.90
DRAO	1.76	1.95	2.70	WROC	2.69	1.33	2.41
DUND	1.21	1.18	5.21	ZIM3	2.07	2.65	5.91
DYNG	1.67	1.37	4.99	WUH2	1.23	3.11	3.77
GMSD	1.54	2.35	3.96	USN9	2.71	3.04	4.50
GOP7	2.69	2.13	5.59	SGOC	3.45	2.73	4.56
GRA1	2.66	2.24	3.84	NKLG	1.29	2.48	3.29



a N方向



b E方向



c U方向

图3　BDS-2+BDS-3 PPP三维坐标残差RMS值

注：测站序号同图1。

4　结　语

本文分析了海潮模型对BDS-2、BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP的影响，结果表明静态PPP过程中加入海潮模型，对BDS-2、BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP三维方向坐标精度均有不同程度的提升，提升效果均为毫米级，其中U方向提升效果最佳，N、E方向效果相当。与BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP相比，BDS-2 PPP的提升效果更显著，可能是由BDS-3和BDS-2+BDS-3 PPP精度较高所导致的。因此，今后BDS PPP过程中推荐加入海潮模型，以进一步提高PPP精度。本文在实验过程中只对比分析了全球海潮模型（FES2004）对BDS PPP的影响，不同海潮模型在不同地区的适应性将是后续研究的重点。

参考文献

[1] 张胜凯,雷锦韬,李斐. 全球海潮模型研究进展[J]. 地球科学进展,2015,30(5):579-588

[2] 由晓文. 中国沿海地区海潮负荷位移建模[D]. 成都市:西南交通大学,2016

[3] 邵先锋,刘流,贾雪. 多GNSS系统组合PPP定位精度评估[J]. 地理空间信息,2021,19(4):44-50

[4] 宋大鹏,李玉海,崔素梅,等. GPS/Galileo/QZSS精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(5):63-67

[5] 徐欣彤,杨志鑫,张林杰,等. BDS-3实时精密产品质量评估及其PPP性能分析[J]. 测绘通报,2021(3):18-22

[6] 王俊杰,郭锴. 不同海潮模型对闽海潮负荷位移估计的影响[J]. 测绘科学,2021,46(10):13-19

[7] 魏国光,王琪洁,彭葳,等. 利用短期静态PPP结果反演海潮负荷位移[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(6):607-612

[8] 赵红,郭春喜,程传录,等. 利用改进的动态PPP技术建立中国香港区域海潮负荷位移模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(3):355-363

[9] 杨子辉,薛彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J]. 导航定位学报,2022,10(1):1-14

[10] 杨军. 北斗卫星导航系统建设与发展[J]. 卫星应用,2021(6):12-15

[11] 欧阳亿,王琪洁,魏国光. 利用海潮模型研究D-InSAR中的海潮负荷效应[J]. 测绘地理信息,2022,47(2):39-44

[12] 张化疑. 基于GNSS的海潮负荷位移研究[D]. 武汉:武汉大学,2020

[13] 何金鑫,章浙涛,何秀凤. FES2004和GOT4.7海潮模型改正对全球PPP的影响特征及差异分析[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(6):612-617

[14] 范文蓝,姜卫平,袁林果,等. 不同海潮模型对中国沿海区域海潮负荷位移改正影响分析[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(6):598-602