引文格式：梁杰华,常列,宋春龙. 固体潮模型在GPS/BDS PPP中的影响分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 82-84. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.019

固体潮模型在GPS/BDS PPP中的影响分析

梁杰华[1]，常　列[1]，宋春龙[2]
（1. 交通运输部南海航海保障中心 广州海事测绘中心，广东 广州 510000；
2. 山东正元数字城市建设有限公司，山东 烟台 264000）

摘　要：针对固体潮改正模型对GPS/BDS精密单点定位（PPP）的影响问题，借助IERS2003固体潮改正模型分别对GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3、GPS+BDS-2+BDS-3定位结果进行定量分析。结果表明，固体潮改正模型使GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3、GPS+BDS-2+BDS-3的PPP结果在N、E和U方向的平均改正量分别为1.06 cm、1.01 cm、3.77 cm，0.87 cm、1.09 cm、3.48 cm，1.30 cm、1.32 cm、5.29 cm，1.45 cm、1.85 cm、6.37 cm以及1.71 cm、1.83 cm、6.41 cm。

关键词：固体潮模型；PPP；IERS2003
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0082-03

Influence Analysis of Earth Tide Model in GPS/BDS Precision Point Positioning

LIANG Jiehua[1], CHANG Lie[1], SONG Chunlong[2]
(1. Nanhai Navigation Support Center of the Ministry of Transport Guangzhou Maritime Surveying and Mapping Center, Guangzhou 510000, China;
2. Shandong Zhengyuan Digital City Construction Co., Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the earth tide correction model will have an impact on the precision point positioning (PPP) of GPS/BDS, we used IERS2003 earth tide correction model to quantitatively analyze the positioning results of GPS, BDS-2, BDS-3, BDS-2+BDS-3 and GPS+BDS-2+BDS-3 respectively. The results show that the earth tide correction model will have a great impact on the PPP of each system. The average correction of GPS PPP results in N, E and U directions are increased by 1.06 cm, 1.01 cm and 3.77 cm respectively, BDS-2 PPP increased by 0.87 cm, 1.09 cm and 3.48 cm, BDS-3 PPP increased by 1.30 cm, 1.32 cm and 5.29 cm, BDS-2+BDS-3 PPP increased by 1.45 cm, 1.85 cm and 6.37 cm, GPS+BDS-2+BDS-3 PPP increased by 1.71 cm, 1.83 cm and 6.41 cm.

Key words: earth tide model, PPP, IERS2003

地球固体潮是指固体地球在日月引力作用下引起的弹性形变，使地球表面产生周期性的涨落[1-2]。研究表明，固体潮会使测站的位置坐标产生周期性变化，垂直方向最大位移为80 cm。在精密单点定位（PPP）过程中，若进行长时间静态观测，一般可消除大部分周期项误差，但无法完全消除长期项误差，通常采用模型进行改正[3]。固体潮与海潮形成的原因相同，但模型的建立远比海潮模型复杂[4]。随着全球导航卫星系统（GNSS）的快速发展，北斗卫星导航系统（BDS）正式组网，将在导航、定位和授时等方面提供服务[5]。PPP技术因具备无需基准站、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[6-8]。如何进一步提高PPP精度是广大学者面临的问题，而固体潮模型改正是进一步提高PPP定位精度的方式之一，也是国内外学者的研究方向之一。李艳红[3]等分析了全球范围内66个IGS站BDS观测数据的固体潮影响，结果表明固体潮对U方向改正量最大，部分测站改正量大于10 cm，且在BDS PPP过程中必须加入固体潮改正；胡金林[9]基于IERS2003固体潮模型对5个IGS站和两个CORS站GPS观测数据进行解算，结果表明固体潮模型对测站N、E和U方向均有较明显的改正，基于IERS2003固体潮模型的改正可达毫米级定位精度；肖亮明[10]等对全球33个IGS观测站数据进行研究发现，固体潮模型在GPS PPP定位中改正量可达10 cm，且存在周期性变化规律。已有文献主要分析固体潮

收稿日期：2022-05-09。
项目来源：邯郸市科学技术研究与发展计划资助项目（21422903367）；山东省科技攻关计划资助项目（2010GZX20125）。
第一作者简介：梁杰华（1987—），工程师，从事海洋测绘理论与应用研究工作，E-mail：liangjiehua0012@163.com。

改正模型在GPS或BDS数据静态PPP的改正量，缺少固体潮改正模型对GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3和GPS+BDS-2+BDS-3 PPP改正量综合性分析的文献。因此，本文基于IGS分析中心提供的GPS和BDS观测数据，对比分析了固体潮改正模型在GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3和GPS+BDS-2+BDS-3 PPP中的影响。

1　数学模型

1.1　固体潮改正模型

固体潮改正通常只考虑二阶潮和三阶潮的影响。二阶潮、三阶潮改正的表达式分别为[9]：

$$\Delta r=\sum_{j=2}^{3}\frac{\left(\mathrm{GM}_j\mathrm{R}_\mathrm{e}^4\right)}{\left(\mathrm{GM}_i R_j^3\right)}\left(h_2\hat{\boldsymbol{r}}\left(\frac{3}{2\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)^2}-\frac{1}{2}\right)+3l_2\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j-\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)\hat{\boldsymbol{r}}\right)\right) \tag{1}$$

$$\Delta r=\sum_{j=2}^{3}\frac{\left(\mathrm{GM}_j\mathrm{R}_\mathrm{e}^4\right)}{\left(\mathrm{GM}_i R_j^3\right)}\left(h_3\hat{\boldsymbol{r}}\left(\frac{5}{2\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)^2}-\frac{3}{2\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)}\right)+l_3\left(\frac{5}{2\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)^2}-\frac{3}{2}\right)\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j-\left(\hat{\boldsymbol{R}}_j\hat{\boldsymbol{r}}\right)\hat{\boldsymbol{r}}\right)\right) \tag{2}$$

式中，GM_j为万有引力常数，$j=2$为月亮、$j=3$为太阳；GM_i为地球万有引力常数；$\hat{\boldsymbol{R}}_j$、R_j分别为地心到月球/太阳距离的单位向量和模；R_e为地球赤道半径；$\hat{\boldsymbol{r}}$、r分别为地心到测站距离的单位向量和模；h_2为2阶Love数的标称值；l_2为2阶Shida数的标称值。

1.2　双频无电离层PPP

双频PPP定位模型的表达式为[11-12]：

$$\begin{cases}P_{IF}=\dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}P_1-\dfrac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}P_2\\ \vartheta_{IF}=\dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}\vartheta_1-\dfrac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\vartheta_2\end{cases} \tag{3}$$

式中，P_{IF}、ϑ_{IF}分别为伪距观测值和相位观测值，单位为m；f_1、f_2分别为载波相位观测值的频率，单位为MHz。

2　数据选取与处理策略

为对比分析固体潮改正模型在GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3和GPS+BDS-2+BDS-3 PPP中的应用，本文选取2020年年积日001—060全球具有GPS和BDS观测数据的20个IGS站观测数据进行处理，站点分布见图1。

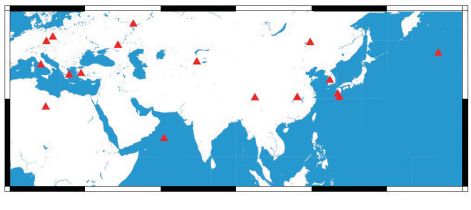


图1　站点分布图

本文设计了5组对照实验（10个方案），各方案的电离层延迟均采用无电离层组合模型，对流层延迟均采用Saastamoinen模型+GMF映射函数进行改正，精密星历均采用事后SP3产品，天线相位中心均使用IGS14产品进行改正。第一组实验采用GPS观测数据，方案1未使用固体潮模型改正，方案2采用IERS2003固体潮模型进行改正，通过对比二者的静态PPP，可进一步研究固体潮模型对GPS PPP的影响；同理，第二、三、四、五组实验分别对比分析固体潮模型在BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3、GPS+BDS-2+BDS-3中的影响。

3　实验结果分析

本文以IGS数据中心提供的测站坐标为参考值，将未进行固体潮改正和固体潮改正的静态PPP结果分别与参考值求差，以两组差值的互差绝对值表示固体潮改正模型对PPP的影响。GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3、GPS+BDS-2+BDS-3静态PPP在N、E、U方向的结果见图2~6，可以看出，无论哪种观测数据各测站PPP结果均显示U方向改正量最大，原因在于固体潮主要是由日月引起地球表面升降造成的，因此固体潮模型对U方向的改正量大于N、E方向。

采用IERS2003固体潮改正模型使GPS PPP结果在N、E和U方向的最大改正量分别为1.94 cm、1.76 cm、6.28 cm，平均改正量分别为1.06 cm、1.01 cm、3.77 cm；使BDS-2 PPP结果在N、E和U方向的最大改正量分别为2.20 cm、1.85 cm、7.57 cm，平均改正量分别为0.87 cm、1.09 cm、3.48 cm；使BDS-3 PPP结果在N、E和U方向的最大改正量分别为1.99 cm、

2.37 cm、9.88 cm，平均改正量分别为1.30 cm、1.32 cm、5.29 cm；使BDS-2+BDS-3 PPP结果在N、E和U方向的最大改正量分别为2.36 cm、2.53 cm、10.70 cm，平

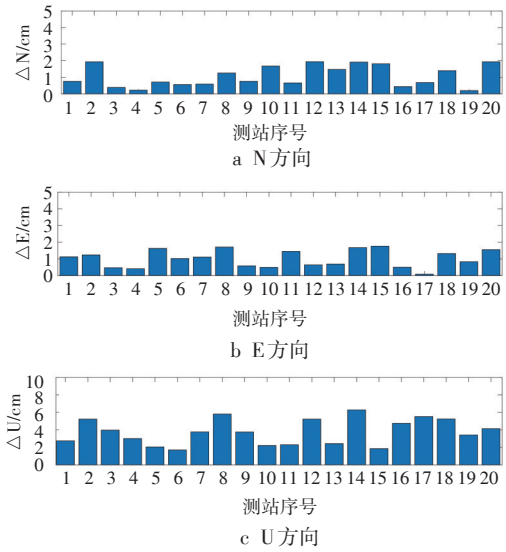


图2 GPS静态PPP三维方向误差

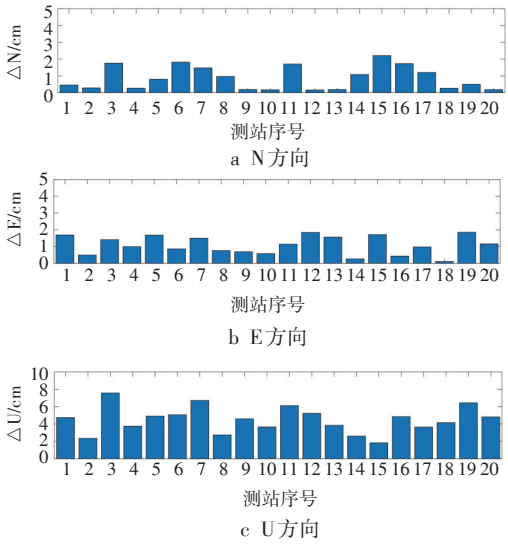


图3 BDS-2静态PPP三维方向误差

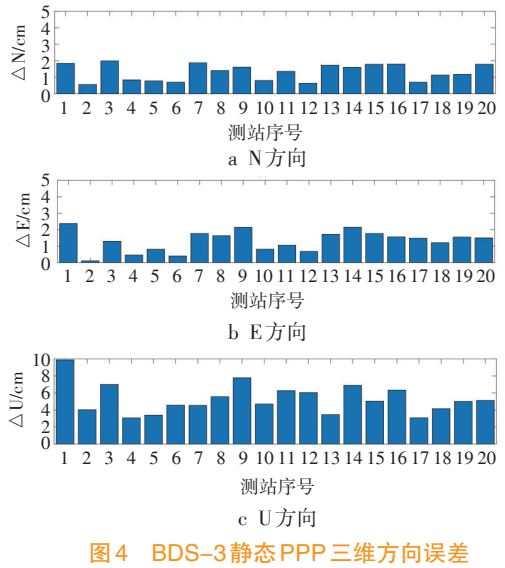


图4 BDS-3静态PPP三维方向误差

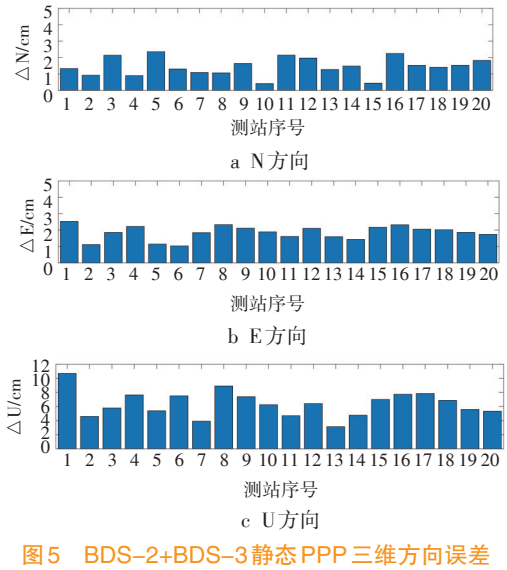


图5 BDS-2+BDS-3静态PPP三维方向误差

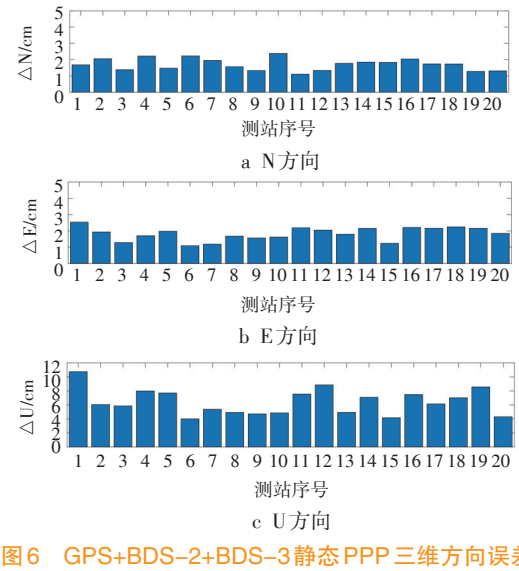


图6 GPS+BDS-2+BDS-3静态PPP三维方向误差

均改正量分别为1.45 cm、1.85 cm、6.37 cm；使GPS+BDS-2+BDS-3 PPP结果在N、E和U方向的最大改正量分别为2.38 cm、2.53 cm、10.73 cm，平均改正量分别为1.71 cm、1.83 cm、6.41 cm；固体潮改正模型对各系统下的PPP都有较大影响，最大可超过10 cm。对于同一系统的PPP，固体潮改正模型对不同测站PPP结果改正量不同，可能是由于测站所处的三维地理空间位置不同，受地球弹性形变影响不同造成的；对于同一测站，固体潮模型对PPP结果在U方向的改正量优于N、E方向，可能是由于PPP过程中受卫星分布影响，U方向误差最大，可供改正量较大，且固体潮模型是改正PPP过程中地球表面升降造成的误差。

4 结 语

本文对比分析了IERS2003固体潮模型对GPS、BDS-2、BDS-3、BDS-2+BDS-3、GPS+BDS-2+BDS-3

（下转第91页）