

联合中国近海海潮模型与全球海潮模型分析 海潮负荷对 GPS 精密定位的影响

赵 红^{1,2} 张 勤¹ 瞿 伟¹ 涂 锐³ 刘 智⁴

1 长安大学大地测量与测量专业,陕西 西安,710054

2 国家测绘地理信息局大地测量数据处理中心,陕西 西安,710054

3 中国科学院国家授时中心,陕西 西安,710600

4 机械工业勘察设计研究院有限公司,陕西 西安,710043

摘要:利用卫星测高技术建立的全球海潮模型的精度和分辨率均有限,而高精度、高分辨率的近海区域潮汐观测资料,可用于改善和提高全球海潮模型在沿海地区的精度。利用中国东海和南海的近海海潮模型,对 HAMTIDE11A. 2011 全球海潮模型中的中国近海区域进行了替换,并得到了修正前后模型计算的海潮负荷对不同区域 GPS 测站精密定位的影响。分析可得:(1)确认修正前后的全球海潮模型计算的海潮负荷对 GPS 测站精密定位的影响存在约 5 mm 的差异,并通过频谱分析得到修正后的模型在 GPS 精密定位中剔除海潮负荷影响的效果在半日、周日及半年周期处明显优于修正前的模型;(2)采用高精度近海模型进一步修正全球海潮模型,该成果对近海区域的 GPS 精密定位海潮负荷改正具有一定参考价值。

关键词:全球海潮模型;近海海潮模型;海潮负荷;GPS 精密定位

中图法分类号:P228

文献标志码:A

地球受日月引潮力的作用会产生潮汐,潮汐导致固体地球及海底负载发生变化,这一现象称为海潮负荷效应。海潮负荷效应对地球物理场观测会产生一定的影响。许多学者对该领域进行了研究^[1],发现海潮负荷对沿海测站 GPS 定位的影响达 cm 级,为内陆地区的 4~5 倍^[2-4];在高精度大地测量中海潮负荷效应不可忽视,尤其是对高精度观测的影响,需要建立相应的模型进行海潮负荷改正^[5];利用超导重力仪最新观测结果对海潮模型进行研究,得到全球海潮模型的适应性及不同模型中不同潮波具有明显的区域性特点^[6]等结论。

目前 GPS 精密定位中主要依赖全球海潮模型进行海潮负荷效应改正。卫星测高技术获取的长期海面高数据是建立全球海潮模型的基础。卫星测高数据虽可精确地给出深海区域的海潮特征,但在近海区域受特殊海岸线及复杂海底地形的影响,用卫星测高技术得到的全球海潮模型精

度有限,不能精确改正海潮负荷的影响,尤其对沿海地区的高精度观测^[7-9]。而验潮站能提供高精度、高分辨率的近海潮汐观测资料,能更好地反映局部海水的潮汐变化特征^[8,9]。许多学者对此也开展了相关研究,如研究了南极地区的重力固体潮,表明近海潮汐效应对负荷研究很有必要,用高精度近海海潮资料替换全球海潮模型中的相应区域,能够有效地改正近海潮汐效应这一不利因素^[8,9];有学者利用 TPX06 全球海潮模型及东海和南海潮汐资料^[1],研究了近海潮汐效应对测站定位的影响,以及修正的全球海潮模型对计算中国及邻区重力场负荷的影响^[1]。上述研究均表明,用高精度的近海海潮模型修正全球海潮模型^[7]的相应区域,分析研究海潮负荷的影响是合理且有必要的。

本文联合中国近海海潮模型 osu. chinasea. 2010 和全球海潮模型 HAMTIDE11A. 2011 研究了海潮负荷对 GPS 精密定位的影响。利用积分

收稿日期:2015-07-31

项目资助:长安大学优秀博士项目(310826150007);国家自然科学基金(41304033, 4154006, 41202189, 41274005);中国科学院率先行动百人计划;中国博士后项目(2013M530412);中央高校助研基金(CHD2014G1261051, CHD2014G1261050, CHD2014G3263014);陕西省自然科学基础研究计划(2016JM4005)。

第一作者:赵红,博士,主要研究方向海潮负荷对 GPS 定位的影响及 GPS 数据处理。zhaohong710@163.com

通讯作者:张勤,教授。zhangqinle@263.net.cn

格林函数方法^[2]结合中国近海海潮模型对HAMTIDE11A. 2011全球海潮模型中的相应区域进行了替换，并计算了替换前后模型得到的海潮负荷对不同区域GPS测站精密定位的影响，得到全球海潮模型修正前后计算的海潮负荷对测站定位影响的差异，同时比较了修正前后的海潮模型在GPS定位中剔除海潮负荷影响的效果。

1 中国近海海潮模型和全球海潮模型信息及近海模型修正全球模型原理

1.1 高精度中国近海海潮模型(osu. chinasea. 2010)及全球海潮模型基本信息

图1是22个高精度近海潮汐模型在全球范围的分布图^[7]，其中16号代表中国东海和南海高精度潮汐模型(osu. chinasea. 2010)，该模型是俄勒冈州立大学的Erofeeva和Egbert基于流体动力学方程同化T/P测高数据构建的局部海潮模型。表1列出了osu. chinasea. 2010模型和不同系列全球海潮模型的基本信息，与EOTlla^[8]、TPXO. 7.2^[9]等全球海潮模型的分辨率及构建方法相比，HAMTIDE11A. 2011海潮模型不仅是目前国际上较新的一个全球海潮模型，基于15 a的

TOPEX卫星测高和Jason-1重力数据反演而成^[10]，而且相比其它模型，其分辨率较高，因此本文选取HAMTIDE11A. 2011全球海潮模型作为研究对象。

1.2 高精度近海海潮模型修正全球海潮模型原理

受近海区域特殊海岸线和复杂海底地形的影响^[5]，利用卫星测高技术得到的全球海潮模型在近海区域的精度有限，从而可利用高精度高分辨率的近海海潮模型替换全球海潮模型的相应近海区域^[7]。此时，海潮瞬时潮高与格林函数的褶积积分为：

$$L'(\theta, \lambda, t) = \rho_w R^2 \iint_{S_G - S_L} H(\theta', \lambda', t) G(\varphi, A) \cdot \sin \varphi d\varphi dA + \rho_w R^2 \iint_{S_L} H_L(\theta', \lambda', t) G(\varphi, A) \sin \varphi d\varphi dA \quad (1)$$

式中， ρ_w 是海水密度； R 是地球半径； (θ, λ) 和 (θ', λ') 分别是测站和负荷点(海潮模型的每个格网的中心点)的球坐标； φ 是测站和负荷点之间的球面角，可按 $\cos \varphi = \sin \theta \sin \theta' + \cos \theta \cos \theta' \cdot \cos(\lambda - \lambda')$ 求出； A 是测站到负荷点的方位角； $H_L(\theta', \lambda', t)$ 表示近海区域 S_L 的瞬时潮高； $H(\theta', \lambda', t)$ 是 (θ', λ') 处的瞬时潮高； $G(\varphi, A)$ 是位移负荷

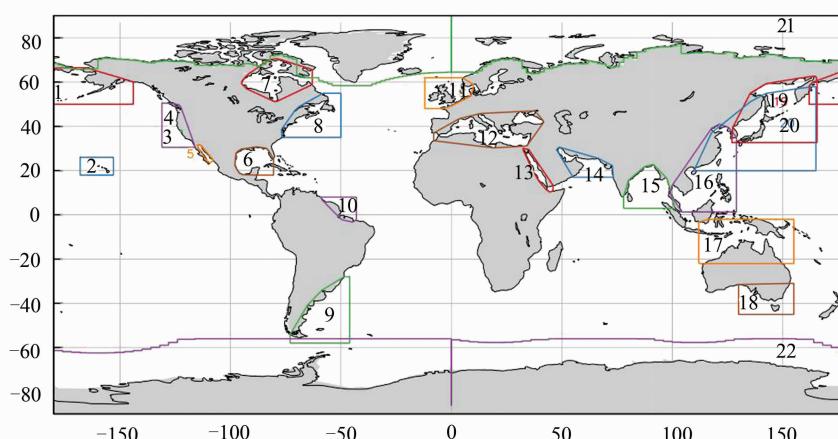


图1 全球范围的高精度近海模型分布

Fig. 1 Globe Distribution of Local Ocean Tide Models

表1 近海及全球海潮模型的基本信息

Tab. 1 Basic Information of Local and Global Ocean Tide Model

模型	分辨率	覆盖范围	构建方法
osu. chinasea. 2010	$0.03^\circ \times 0.03^\circ$	$1^\circ \text{N} \sim 41^\circ \text{N}$ $98^\circ \text{E} \sim 129^\circ \text{E}$	T/P+流体动力学模型
HAMTIDE11A. 2011	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$	全球	T/P+Jason-1 反演
EOTlla	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$	全球	多任务测高反演
FES2004	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$	全球	T/P+ERS-2+验潮站+流体动力学模型
TPXO. 7.2	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	全球	T/P+Jason+流体动力学模型
CSR4. 0	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	全球	T/P 反演
Schwiderski	$1^\circ \times 1^\circ$	全球	验潮站+流体动力学模型

格林函数和方位角的组合。

根据文献[11,12]的近海潮汐效应对测站位移的负荷影响研究可知,负荷的影响主要来自于近区的海潮影响,因此本文只采用中国 osu. chinasea. 2010 模型替换 HAMTIDE11A 全球海潮模型的 $1^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}, 98^{\circ}\text{E} \sim 129^{\circ}\text{E}$ 区域,并对该中国区域的测站进行研究。

因此,本文近海效应就是考虑近海模型与不考虑近海模型的差异^[5]:

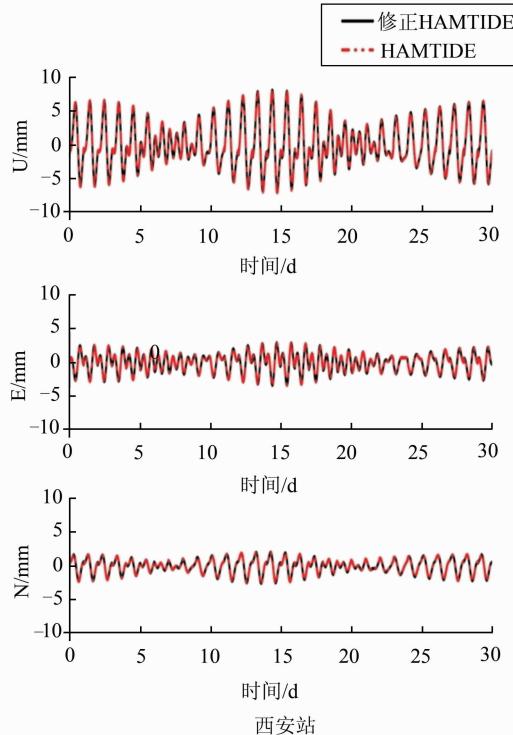
$$\delta L = L'(\theta, \lambda, t) - L(\theta, \lambda, t) \quad (2)$$

式中, $L'(\theta, \lambda, t)$ 为考虑近海模型的海潮负荷; $L(\theta, \lambda, t)$ 为不考虑近海模型的海潮负荷。总的海潮负荷效应就是不同潮波的叠加^[2]。

2 实例分析与讨论

2.1 全球海潮模型经中国近海海潮模型修正前后计算的海潮负荷对我国不同测站位移的影响分析

本文首先比较了 HAMTIDE11A. 2011 全球海潮模型经 osu. chinasea. 2010 模型修正前后(以下简称经近区海潮模型修正后的全球海潮模型为



修正的 HAMTIDE11A 模型)计算的海潮负荷对我国内陆和沿海 IGS 站(西安站和上海站)位移的影响,计算时间为 2010 年 7 月 1 日开始的连续 30 d。用 SPOTL 软件分别计算西安站和上海站修正前后 8 个潮波的负荷参数,再根据不同潮波的叠加,计算海潮负荷对 GPS 测站位移在垂直 U、东西 E、南北 N 三个方向的影响^[2,10],如图 2 所示。

由图 2 可看出,经中国近海海潮模型修正前后计算的海潮负荷影响,在近海处(上海站)两者的差异较大(水平方向差异为 1 mm, 垂直方向差异为 5 mm),远海处(西安站)差异小于 1 mm,可忽略不计。由图 2 总结可知,该全球海潮模型计算的海潮负荷对不同区域的 GPS 测站位移有不同程度的影响,对近海处(如上海站)的影响明显大于远海处(如西安站)的影响。这样的影响对高精度的 GPS 垂直测量是不能忽略的。

2.2 近海效应对我国不同观测站定位结果的影响分析

由式(2)求出近海海潮模型修正前后的全球海潮模型之间的差异,即近海效应。其包括 8 个潮波 $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ 的叠加,表 2 以 M_2 潮波为例列出了该潮波的近海效应在 U、E、N 分量的振幅值。

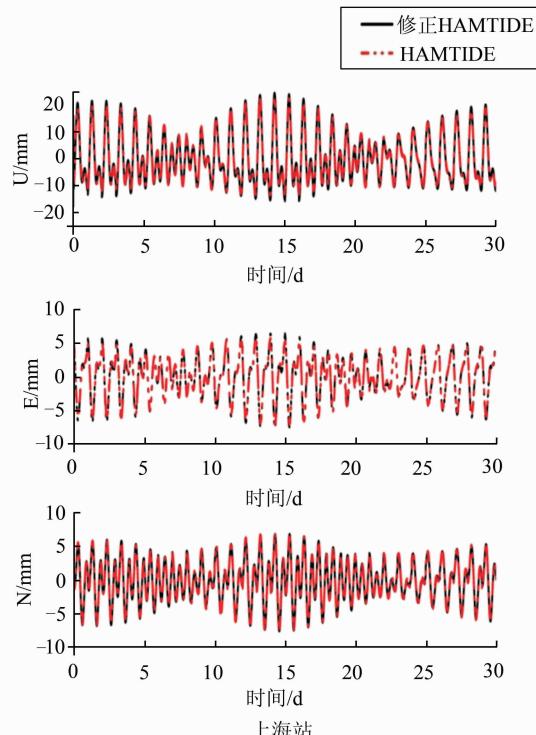


图 2 修正与未修正的 HAMTIDE11A. 2011 全球模型计算的海潮负荷对内陆及沿海测站位移影响的时间序列

Fig. 2 Effect Time Series of Ocean Tide Loading Calculated by Global Ocean Tide Model Elaboration and Non-elaboration Based on Inland and Coast Stations

表 2 近海效应中 M_2 潮波对不同测站位移各分量的负荷影响

Tab. 2 Effect of Local Ocean Tide Loading of M_2 Constitute on Stations' Displacement

振幅/mm	M_2 潮波			
	西安	香港	上海	厦门
垂直分量	0.06	0.23	0.77	1.94
东西分量	0.03	0.11	0.26	0.14
南北分量	0.01	0.07	0.16	0.2

由表 2 看出, M_2 潮波的近海效应对厦门测站位于垂直分量的负荷影响约为 2 mm, 而 M_2 潮波的近海效应对所有测站水平位移的影响都小于 1 mm, 对内陆的西安测站影响最小。

因此, 全球海潮模型计算的海潮负荷在近海岸线以及海湾处的近海区域精度较差, 对于近海区域的高精度 GPS 数据处理需要考虑高精度、高分辨率的近海资料修正全球海潮模型后进行海潮负荷效应改正。

进一步, 为了得到总的近海效应对不同测站位移的负荷影响^[7], 图 3 和图 4 分别给出了近海潮汐效应对不同测站位移垂直和水平方向的影响^[7], 时间均为自 2010 年 7 月 1 日开始的连续 30 d。

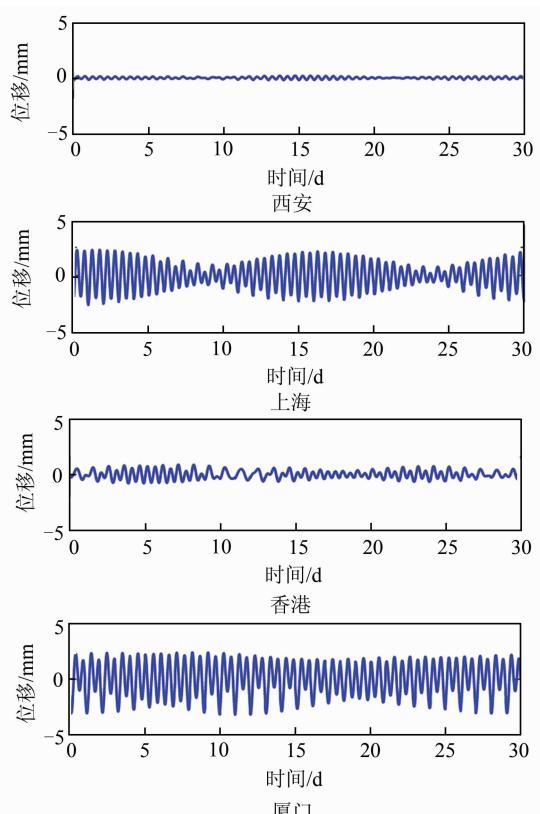


图 3 近海潮汐效应对不同测站位移垂直方向的影响

Fig. 3 Effect of Local Tide Loading on up Displacement of Different Stations

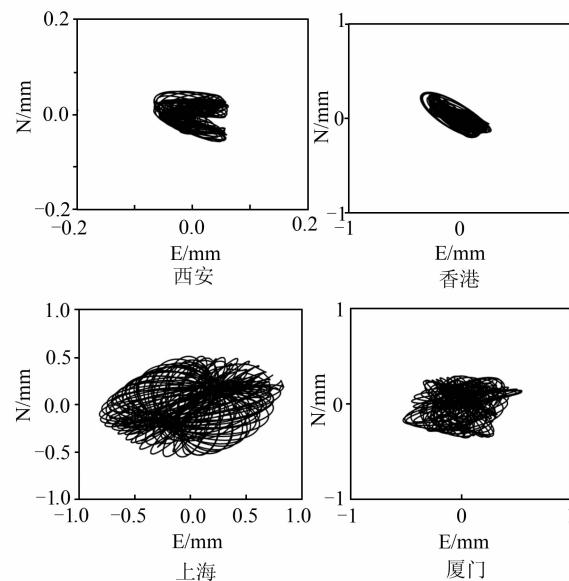


图 4 近海潮汐效应对不同测站位移水平方向的影响

Fig. 4 Effect of Local Tide Loading on Horizontal Displacement of Different Stations

由图 3 可以得出, 在 GPS 测站位移的垂直分量上, 近海潮汐效应在西安站的影响最小 (0.2 mm 左右), 而对厦门站的影响最大, 约为 5 mm, 对上海站影响的振幅约为 3 mm, 且呈现半月周期的特性, 说明近海效应对沿海站的影响远大于内陆站。

由图 4 可以看出, 近海效应对测站水平位移的影响较小, 其影响主要集中在垂直方向。同时负荷对各测站影响的最大值始终在一个固定的方向上。

2.3 经近海海潮模型修正前后的全球海潮模型在近海区域 GPS 精密定位中剔除海潮负荷影响的效果比较

为了进一步验证利用高精度近海海潮模型修正全球海潮模型在近海区域 GPS 精密定位中的实用性, 本文分析比较修正前后的 HAMTIDE11A. 2011 全球海潮模型在 GPS 精密定位中剔除海潮负荷影响的效果。

以上海站为例, 采用课题组研发的精密单点定位软件包, 其静态精度为 mm 级, 动态精度为 1 ~ 2 cm^[14]。选取上海站 2006 ~ 2011 共 6 a 的 GPS 观测数据, 数据处理分别采用 GPS 短周期解 (采用 3 h 为间隔重叠计算, 每小时开始时对未知参数的协因数阵重新进行初始化, 但继承模糊度等信息, 从而得到单天 24 h 对应的坐标结果, 精度为 mm 级) 模式和 GPS 精密单点定位单天解模式, 两种解算模式分别采用两种方案获得测站坐

标时间序列,再通过频谱分析比较修正前后模型改正海潮负荷影响的效果。

方案 1 采用经过中国近海海潮模型修正的 HAMTIDE11A. 2011 海潮模型提供的潮波参数进行海潮负荷改正;

方案 2 直接采用 HAMTIDE11A. 2011 海潮模型提供的潮波参数进行海潮负荷改正。

GPS 短周期解与 GPS 单天解均采用方案 1 与方案 2 计算的上海站时间序列振幅谱,结果比较见图 5、图 6。

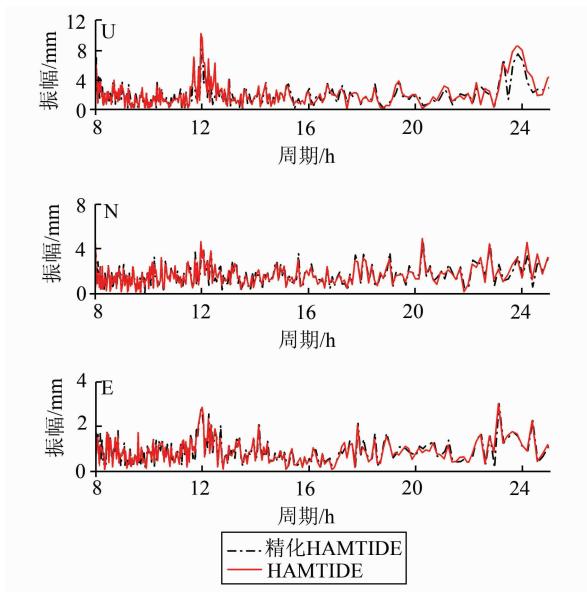


图 5 全球海潮模型修正前后改正 GPS 短周期解时间序列海潮负荷影响效果比较

Fig. 5 Comparison of the Results of Ocean Tide Loading Correction Computed by Elaboration and Non-elaboration Global Ocean Tide Model on GPS Sub-daily Solution

图 5 是方案 1 与方案 2 得到的上海站 GPS 短周期解的 U、N、E 时间序列值的频谱分析结果,在测站的 U 方向 12 h 附近及 24 h 附近处黑色曲线对应的振幅谱值明显小于红色曲线,且两者的差异约为 3~4 mm,E 和 N 方向黑色曲线与红色曲线无明显差异。图 6 是方案 1 与方案 2 得到的上海站 GPS 单天解的 U、N、E 时间序列值的频谱分析结果,结果显示,在半年周期处,修正的海潮模型时间序列探测出的信号振幅小于未修正的海潮模型(差异在垂直方向为 1.2 mm、南北方向 0.9 mm、东西方向为 0.6 mm)。由于海潮 8 个潮波中近海效应较大的 M_2 与 K_1 潮波周期为 12.42 h 与 23.9 h,从而会影响时间序列中的半日、周日、半年信号,因而修正的海潮模型可有效地减弱 GPS 时间序列中的半日、周日、半年信号

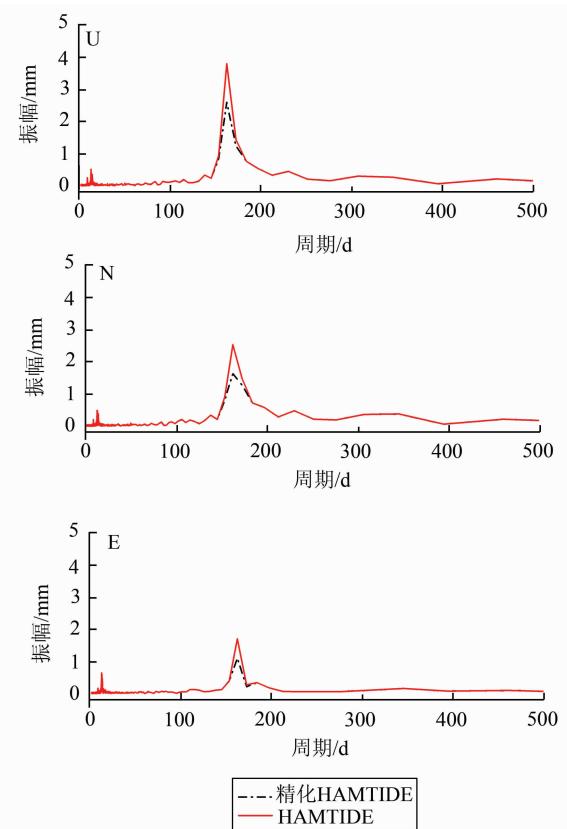


图 6 全球海潮模型修正前后改正 GPS 单天解时间序列海潮负荷影响效果比较

Fig. 6 Comparison of the Effects of Ocean Tide Loading Correction Computed by Elaboration and Non-elaboration Global Ocean Tide Model on GPS Daily Solution

的影响。分析结果表明,经近海资料修正的 HAMTIDE11A. 2011 海潮模型改正海潮负荷影响的效果优于未修正的全球海潮模型,这对近海区域 GPS 高精度精密定位的海潮负荷改正具有一定参考价值。

3 结语

- (1) HAMTIDE11A. 2011 全球海潮模型经中国近海海潮模型修正前后对测站位移影响有显著差异,在沿海区域达到了 5 mm;
- (2) 近海潮汐效应对测站位移垂直方向的影响明显大于水平方向的影响,在沿海地区的高精度 GPS 观测中不容忽视;
- (3) 全球海潮模型经近海模型修正后,改正海潮负荷影响的效果较未修正的模型有明显改善,验证了采用高精度的近海模型来修正全球海潮模型的可行性,对近海区域 GPS 高精度定位的海潮负荷改正具有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhou Jiangcun, Sun Heping. Influence of the Modified Global Ocean Tide Model with Local Tides of East and South China Seas on Load Gravity in China and Its Neighbor Areas[J]. *Earthquake Science*, 2005, 27(3): 332-338(周江存,孙和平.用东海和南海潮汐资料修正全球海潮模型对中国及邻区重力场负荷计算的影响[J].地震学报,2005,27(3):332-338)
- [2] Zhao Hong, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Effect of Ocean Tide Loading on GPS Precise Positioning Based on Different Ocean Tide Models[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(5): 108-112(赵红,张勤,黄观文,等.基于不同海潮模型研究海潮负荷对GPS精密定位的影响[J].大地测量与测量动力学,2012,32(5):108-112)
- [3] Zhang Jie, Li Fei, Lou Yidong, et al. Ocean Tide Loading Effect on GPS Precise Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 12: 1 400-1 404(张杰,李斐,楼益栋,等.海潮负荷对GPS精密定位的影响[J].武汉大学学报·信息科学版,2013,12: 1 400-1 404)
- [4] Liu Youwen, Jiang Weiping, E Dongchen, et al. Ocean Loading Tides Corrections of GPS Stations in Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 10: 899-901(刘友文,姜卫平,鄂栋臣,等.南极国际GPS联测的海潮位移改正[J].武汉大学学报·信息科学版,2007,10:899-901)
- [5] Zhou Xuhua, Wu Bin, Li Jun, et al. Ocean Tide Displacement Corrections in High Precision Geodesy [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 327-330(周旭华,吴斌,李军,等.高精度大地测量中的海潮位移改正[J].测绘学报,2001,30(4): 327-330)
- [6] Sun Heping, Xu Houze, Zhou Jiangcun, et al. Latest Observation Results from Super Conducting Gravimeter at Station Wuhan and Investigation of the Ocean Tide Models[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(2): 299-307(孙和平,许厚泽,周江存,等.武汉超导重力仪观测最新结果和海潮模
- [7] Zhao Hong. The Research of Effect and Model Refinement of Ocean Tide Loading [D], Xi'an: Chang'an University, 2013(赵红.海潮负荷影响及其模型修正研究[D].西安:长安大学,2013)
- [8] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204
- [9] Taguchi E, Stammer D, Zahel W. Ocean Tides Obtained by Data Assimilative HAMTIDE Model [OL]. <http://icdc.zmaw.de/hamtide.html?&L=1>, 2012
- [10] Savcenko R, Bosch W. EOT11A - Empirical Ocean Tide Model from Multi-mission Satellite Altimetry [R], Deutsches Geodatisches Forschungs Institut (DGFI), Munchen, 2012, DOI: 10.1594/PANGAEA.834232
- [11] Zhou Jiangcun, Sun Heping. The Load Effect of Local Tide on Displacement[J]. *Process in Geophysics*, 2007, 22(5): 1 340-1 344(周江存,孙和平.近海潮汐效应对测站位移的负荷影响[J].地球物理学报进展,2007,22(5): 1 340-1 344)
- [12] Xu Jun, Bao Jingyang, Liu Yanchun. Prediction on Time Series Analysis of Water Quality in Yangtze Gorges Reservoir Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(6): 503-507. (许军,暴景阳,刘雁春.潮汐模型对利用卫星测高数据研究海平面变化的影响[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(6): 503-507)
- [13] Agnew D C. SPOTL: A Program for Computing Ocean-Tide Loading[J], *J Geophys Res*, 1997, 102: 5 109-5 110
- [14] Tu Rui, Ge Maorong, Zhang Hongping, et al. The Realization and Convergence Analysis of Combined PPP Based on Raw Observation[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(1): 211-221
- [15] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204

Effect Analysis of Ocean Tide Loading on GPS Precise Positioning Combining High Precision Local Tide Model with Global Ocean Tide Model

ZHAO Hong^{1,2} ZHANG Qin¹ QU Wei¹ TU Rui³ LIU Zhi⁴

1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Center for Geodetic Data Processing, National Administration of Survey, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China

3 National TimeService Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

4 China JK Instituteof Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China

Abstract: The accuracy and resolution of global ocean tide models established by satellite altimetry technology are often limited. The data from local offshore tidal models generated by long-term observation of local tide stations however, is highly precise and at high resolution and could be used to improve the accuracy of global ocean tide models. In this paper, we use the high accuracy local tidal data from the East and South China Seas to refine the local area of the HAMTIDE11A. 2011 global ocean tide model. We also analyze the effect of ocean tide loading observed by elaboration and non-elaboration models on the precise positioning of GPS stations distributed across different areas. The results show that 1) the effects of ocean tide loading calculated by the global ocean tide model elaboration and non-elaboration with precise positioning from GPS stations have a millimeter level difference, and 2) the deduction results for the ocean tide loading effect computed by elaboration model with GPS precise positioning is better than the non-elaboration model using the fast Fourier transform method for the semidiurnal, diurnal and semiannual periods.

Key words: global ocean tide model; local tide model; ocean tide loading; GPS precise positioning

First author: ZHAO Hong, PhD, specializes in the GPS data processing and influence analysis of ocean tide loading on GPS positioning.
E-mail: zhaohong710@163.com

Corresponding author: ZHANG Qin, professor. E-mail: zhangqinle@263.net.cn

Foundation support: The Outstanding Doctor Program of Chang'an University, No. 310826150007; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41304033, 4154006, 41202189, 41274005; the Pioneer & Hundred Talents Program of CAS; the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Universities, Nos. CHD2014G1261051, CHD2014G1261050, CHD2014G3263014; the China Postdoctoral Science Foundation, No. 2013M530412; the Natural Science Basic Research Plan of Shanxi Province of China, No. 2016JM4005.