

海潮负荷对 GPS 精密定位的影响

张 杰¹ 李 斐^{1,2} 楼益栋³ 郝卫峰²

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:根据海潮负荷理论,利用 4 种全球海潮模型分别计算了中国及周边地区 IGS 站的海潮负荷位移系数,分析并比较了海潮负荷位移对 GPS 单天解和短周期解的影响。结果表明,对于测站的单天解,不同海潮负荷位移改正对测站整体上没有影响,只在局部沿海地区测站的垂向方向存在差异;并且,4 种全球海潮模型在黄海和东海的近海区域不够精确,需要利用我国近海区域的海潮资料进行修正;对于测站的短周期解,海潮负荷位移的影响随着测站远离海洋而减弱,特别是在沿海地区能显著提高测站的垂向坐标精度。因此,在短时的 GPS 精密定位中需要考虑海潮负荷位移改正。

关键词:海潮模型;海潮负荷;精密单点定位;测站位移

中图法分类号:P228.41

在日、月等天体引潮力的作用下,海水产生的周期性涨落现象即为海洋潮汐。海潮负荷效应是固体地球对海潮负载的响应,会引起地面测站位置的周期性形变,其影响量值随着观测位置不同而异,而且越靠近海岸地区对测站位置影响越大。研究表明,某些沿海区域的海潮负荷垂向位移可以达到数厘米^[1-3],因此,在高精度 GPS 数据处理中考虑海潮负荷位移改正对于提高 GPS 定位精度和可靠性具有非常重要的意义。对于由 24 h 观测的 GPS 数据处理得到的单天解,由于海潮分潮的周期性特征已经在很大程度上消除了半周日潮和周日潮的影响,因此,海潮负荷位移改正前后的差异主要是长周期潮影响。但是,对于较短周期(小于 24 h)的 GPS 精密定位,海潮负荷位移对测站定位精度的影响需要结合实际 GPS 观测数据进行分析。

海潮负荷位移改正的计算精度主要取决于全球海潮模型的分辨率和精度。近年来,随着卫星测高技术、有限元方法和数据同化技术的发展,国际上陆续发布了一系列全新的全球海潮模型。研究表明,这些全球海潮模型在公海地区精度接近,

但是,由于不规则的海岸线形状、特殊的大陆架地质构造和复杂的海底地形等因素,全球海潮模型在近海地区还不够精确^[4],因此会对沿海区域的 GPS 精密定位结果产生一定的影响。本文采用 FES2004、TPX07.2、FES99 和 NAO.99b^[5-8] 4 种全球海潮模型定量计算了海潮负荷位移效应对我国及我国周边地区部分 IGS 测站精密单点定位精度的影响。

1 海潮负荷位移计算方法

根据 Farrell 负荷理论^[9],海潮负荷对测站位移的影响可通过全球海潮模型和负荷格林函数褶积积分计算求得:

$$\begin{cases} L_U(\varphi, \lambda, t) = \rho_w \iint_{\Omega} H_i(\varphi', \lambda', t) U(\psi) d\Omega \\ L_W(\varphi, \lambda, t) = \rho_w \iint_{\Omega} H_i(\varphi', \lambda', t) V(\psi) \sin A d\Omega \\ L_S(\varphi, \lambda, t) = \rho_w \iint_{\Omega} H_i(\varphi', \lambda', t) V(\psi) \cos A d\Omega \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2013-10-11。

项目来源:国家 863 计划资助项目(2009AA121401);国家自然科学基金资助项目(41174019);湖北省自然科学基金重点创新群体资助项目(2012FFA041);山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放基金资助项目(SD080705)。

其中, L_U, L_W, L_S 分别为 t 时刻海潮负荷引起的测站径向、西向和南向位移; ρ_w 为海水密度; (φ, λ) 和 (φ', λ') 分别为计算点和负荷点的球坐标; ψ 和 A 是计算点到负荷点的球面角距和方位角; Ω 为整个海洋表面; $H_i(\varphi', \lambda', t)$ 表示负荷点处第 i 个分潮的瞬时潮高; $U(\psi), V(\psi)$ 分别为垂直和水平方向的格林函数:

$$\begin{cases} U(\psi) = \frac{a}{m_e} \sum_{n=0}^{\infty} h'_n P_n(\cos\psi) \\ V(\psi) = \frac{a}{m_e} \sum_{n=1}^{\infty} l'_n \frac{\partial P_n(\cos\psi)}{\partial \psi} \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 为地球半径; m_e 为地球质量; h'_n 和 l'_n 为 n 阶负荷勒夫数, 其值可依据地球内部结构模型求解; $P_n(\cos\psi)$ 为勒让德函数。

海潮负荷位移计算的实质是通过式(1)积分在频域中求出各测站处每个分潮的振幅和相位, 因此, 总的海潮负荷位移就是不同潮波的叠加, 即

$$L_j = \sum_{k=1}^N A_{jk} \cos(\omega_k t + \chi_0 - \varphi_{jk}) \quad (3)$$

其中, $L_j (j=1, 2, 3)$ 分别为海潮负荷对测站垂直向、东西向和南北向分量的位移影响; N 为叠加的潮波数; ω_k, χ_0 分别为各分潮角频率和天文幅角初相; A_{jk}, φ_{jk} 分别为各分潮坐标分量的振幅和相位。在海潮负荷位移的实际应用中, 一般考虑 11 个主要分潮的影响, 即 $M_2, N_2, S_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m, S_{sa}$, 其中, M_2, N_2, S_2, K_2 为半日分潮, K_1, O_1, P_1, Q_1 为全日分潮, M_f, M_m, S_{sa} 为长周期潮。

2 计算结果及分析

本文选取了我国及周边地区 14 个 IGS 站来分析海潮负荷位移对 GPS 精密定位的影响, 站点分布如图 1 所示。各 IGS 站的实验数据观测时间段为 2012 年 001 天至 2012 年 031 天, 数据处理采用武汉大学自主研发的 PANDA 软件^[10] 的精密单点定位模式, 数据处理策略为: 利用无电离层组合伪距相位非差观测值, 卫星截止高度角为 7° , 数据采样率为 30 s, 选用 IGS 的绝对天线相位中心改正、卫星精密轨道、卫星精密钟差和地球定向参数, 固体潮和极潮模型改正采用 IERS 规范(2010), 应用 GMF^[11] 估计对流层天顶延迟, 接收机钟差作为白噪声过程求解, 模糊度参数估计为实数解。上述数据处理策略应用于整个 GPS 精密定位数据处理过程。将各测站解算结果与其在

ITRF 参考框架下的已知坐标求差, 并转换至 E、N、U 方向进行比较。

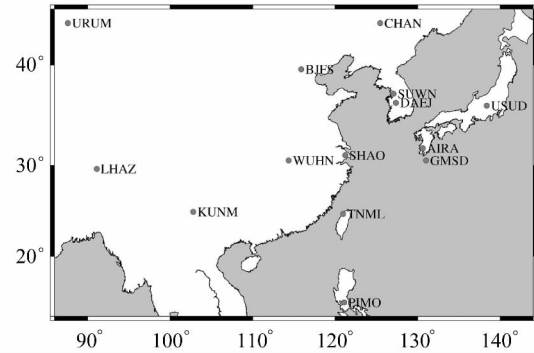


图 1 IGS 站点分布图

Fig. 1 Distribution of IGS Sites

2.1 海潮负荷位移对 GPS 单天解的影响

本文选用 FES2004、TPX07. 2、FES99 和 NAO. 99b 共 4 种全球海潮模型计算的海潮负荷位移参数, 解算了它们对 14 个 IGS 站单天解精度的影响, 海潮负荷位移改正前后的 IGS 站单天解位置误差的均方根(RMS)统计结果见表 1。计算结果表明, 海潮负荷位移改正对各 IGS 站水平方向精度没有明显的改善, 同时, 内陆区域的 IGS 站垂直方向精度也基本相当, 只是沿海测站的垂直方向精度存在差异。其中, PIMO 和 TNML 精度提高了 1 mm 左右, RMS 分别由改正前的 1.21 cm、0.69 提高到 1.11 cm、0.52 cm, 而 GMSD、SHAO、SUWN 的垂直方向精度海潮负荷位移改正后有所降低。这表明海潮负荷效应对沿海测站位移的影响要大于其对内陆区域测站位移的影响, 并且主要影响测站的垂向位置。分析沿海测站的结果可知, 我国南海区域的近海海潮模型能将相应地区测站垂向坐标分量的精度提高 1 mm, 而我国黄海和东海近海区域的海潮模型还不精确, 海潮负荷位移并不能改善该地区测站的精度。因此, 发展我国近海区域海潮模型对全球海潮模型进行修正是提高沿海测站定位精度的关键。计算结果也表明 14 个测站三维坐标的 RMS 平均值在各海潮负荷位移改正前后均相等, 这说明从整体上各海潮负荷位移对测站坐标的单天解没有影响。从统计结果可以看出, 分别利用 FES2004、TPX07. 2、FES99 和 NAO. 99b 海潮负荷位移改正解算得到的各测站坐标精度一致, 这表明 FES2004、TPX07. 2、FES99 和 NAO. 99b 全球海潮模型在我国海域具有相同的模型精度。

表1 IGS站单天解位置误差的均方根统计/cm
Tab.1 RMS of Position Errors for IGS Daily Solutions/cm

站名	改正前			FES2004			NAO99b			TPOX7.2			FES99		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
AIRA	0.32	0.20	0.56	0.31	0.20	0.55	0.31	0.20	0.55	0.31	0.20	0.55	0.31	0.20	0.56
BJFS	0.19	0.17	0.39	0.20	0.16	0.40	0.20	0.16	0.40	0.20	0.16	0.41	0.20	0.16	0.40
CHAN	0.17	0.15	0.35	0.18	0.16	0.36	0.18	0.16	0.36	0.18	0.16	0.36	0.18	0.16	0.36
DAEJ	0.18	0.15	0.44	0.21	0.15	0.42	0.20	0.15	0.43	0.19	0.15	0.43	0.20	0.15	0.42
GMSD	0.27	0.17	0.41	0.28	0.18	0.49	0.29	0.17	0.50	0.29	0.18	0.50	0.28	0.18	0.49
KUNM	0.89	0.20	0.86	0.90	0.19	0.89	0.89	0.19	0.89	0.89	0.19	0.89	0.89	0.19	0.89
LHAZ	0.33	0.27	0.47	0.32	0.27	0.47	0.32	0.26	0.47	0.32	0.26	0.47	0.32	0.26	0.47
PIMO	0.56	0.31	1.21	0.55	0.32	1.11	0.55	0.32	1.12	0.55	0.32	1.11	0.55	0.32	1.11
SHAO	0.24	0.14	0.37	0.26	0.14	0.40	0.25	0.14	0.47	0.25	0.14	0.45	0.27	0.14	0.45
SUWN	0.15	0.14	0.33	0.20	0.15	0.36	0.20	0.15	0.36	0.19	0.15	0.36	0.20	0.15	0.36
TNML	0.45	0.28	0.69	0.41	0.27	0.52	0.41	0.26	0.51	0.41	0.26	0.50	0.44	0.27	0.59
URUM	0.23	0.19	0.50	0.22	0.19	0.50	0.22	0.19	0.50	0.22	0.19	0.50	0.22	0.19	0.50
USUD	0.26	0.46	0.74	0.25	0.45	0.72	0.25	0.46	0.72	0.25	0.46	0.72	0.25	0.46	0.72
WUHN	0.29	0.16	0.48	0.29	0.16	0.49	0.29	0.16	0.49	0.29	0.16	0.49	0.29	0.16	0.48
平均	0.32	0.21	0.56	0.33	0.21	0.55	0.33	0.21	0.56	0.32	0.21	0.55	0.33	0.21	0.56

2.2 海潮负荷位移对 GPS 短周期解的影响

利用 FES2004 全球海潮模型计算了所选 IGS 站的海潮负荷位移改正参数,分别按每时段 2 h、4 h、6 h、8 h、12 h,采用 PANDA 软件解算了加入和不加入海潮负荷位移改正参数时 14 个 IGS 站的坐标。由于海潮负荷主要作用于径向,因此,海潮负荷效应主要影响坐标的垂直方向变化,图 2(a)~2(e)分别为加入和不加入海潮负荷位移改正时按 2 h、4 h、6 h、8 h、12 h 时段解算的 SHAO 站垂向位置误差,图 3 给出了 SHAO 站垂向位置误差的 RMS 统计结果。从图 2 中可以看出,加入海潮负荷位移改正后,按不同时段计算的垂向坐标时间序列比不加入海潮负荷位移改正的垂向坐标时间序列更平滑且残差更小,表明施加海潮负荷位移改正能提高垂向坐标的解算精度。从图 3 中可知,各时段的垂向坐标 RMS 在海潮负荷位移改正前分别为 1.53 cm、1.26 cm、0.98 cm、1.13 cm 和 0.64 cm,海潮负荷位移改正后分别为 1.24 cm、0.83 cm、0.69 cm、0.71 cm 和 0.47 cm,垂向坐标精度依次提高了 0.29 cm、0.43 cm、0.29 cm、0.42 cm 和 0.17 cm,提高幅度为 19%~37%。统计结果表明,海潮负荷位移改正能够显著改善较短周期(小于 24 h)测站的垂向定位精度,因此,在短周期的 GPS 高精度定位中需要顾及海潮负荷位移改正的影响。不同解算时段的 14 个 IGS 站垂向位置误差的 RMS 统计结果见表 2。分析表 2 中的结果可以得出,海潮负荷效应对沿海测站垂向位移的影响要大于其对内陆区域测站的影响,大致上,越接近海边,海潮负荷位移改正对测站位置精度的提高越明显,而海潮负荷位移改正对远离海洋的内陆测站位置精

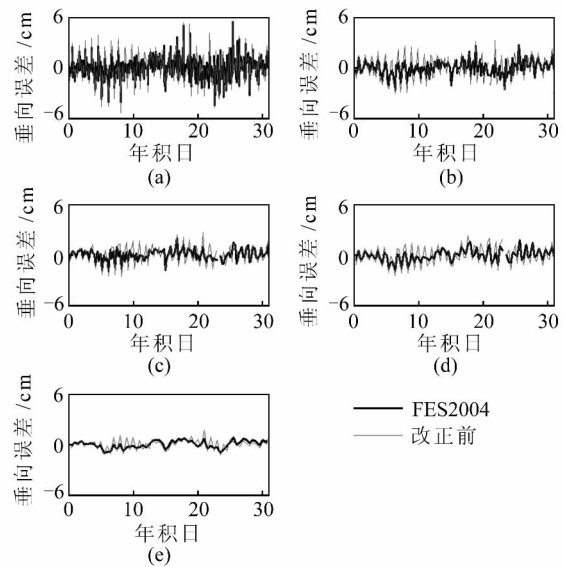


图2 SHAO站垂向位置误差

Fig.2 Vertical Position Errors for SHAO

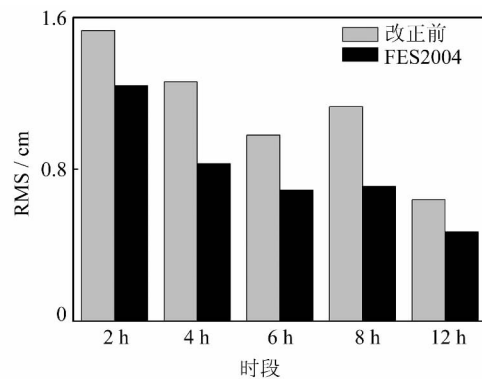


图3 SHAO站垂向位置误差 RMS 统计

Fig.3 RMS of Vertical Position Errors for SHAO

度未造成影响。14 个 IGS 站的不同时段平均值从改正前的 1.90 cm、1.51 cm、1.20 cm、1.11 cm、

0.83 cm 分别减少为 1.64 cm、1.19 cm、0.94 cm、0.85 cm、0.68 cm,整体上精度提升了 2.5 mm,说

明海潮负荷位移改正有效改善了沿海测站的垂向位置精度。

表 2 IGS 站短周期解位置误差均方根统计/cm

Tab. 2 RMS of Position Errors for IGS Sub-daily Solutions/cm

站名	FES2004					改正前				
	2 h	4 h	6 h	8 h	12 h	2 h	4 h	6 h	8 h	12 h
AIRA	2.34	1.61	1.17	1.02	0.76	2.84	2.33	1.79	1.46	1.10
BJFS	0.87	0.74	0.57	0.64	0.41	0.98	0.88	0.70	0.81	0.49
CHAN	0.83	0.66	0.48	0.56	0.41	1.05	0.93	0.69	0.74	0.53
DAEJ	1.21	0.90	0.72	0.74	0.65	1.54	1.29	1.05	1.11	0.86
GMSD	1.47	1.04	0.84	0.82	0.61	2.40	1.99	1.52	1.30	0.99
KUNM	3.49	2.55	1.97	1.39	1.07	3.49	2.57	1.98	1.38	1.06
LHAZ	1.39	1.05	0.92	0.73	0.82	1.40	1.06	0.94	0.76	0.83
PIMO	2.75	2.04	1.68	1.67	1.29	2.92	2.31	1.87	1.99	1.46
SHAO	1.24	0.83	0.69	0.71	0.47	1.53	1.26	0.98	1.13	0.64
SUWN	1.06	0.80	0.54	0.53	0.40	1.36	1.08	0.83	0.71	0.61
TNML	1.34	0.98	0.98	0.76	0.62	1.86	1.61	1.48	1.38	1.06
URUM	1.24	0.89	0.74	0.63	0.53	1.27	0.92	0.75	0.63	0.53
USUD	1.53	1.13	0.94	0.91	0.86	1.78	1.47	1.21	1.25	0.81
WUHN	2.20	1.49	0.91	0.83	0.58	2.20	1.48	0.97	0.94	0.64
平均	1.64	1.19	0.94	0.85	0.68	1.90	1.51	1.20	1.11	0.83

3 结 语

本文利用我国及周边地区的 14 个 IGS 站 1 mon 的观测资料,采用精密单点定位技术解算了各测站海潮负荷改正前后的坐标。对于 GPS 单天解精密定位结果,4 种海潮负荷位移模型改正前后得到的定位结果精度相当,说明从整体上各海潮负荷位移对测站坐标的单天解没有影响。但是,局部沿海地区测站的垂向坐标存在差异,海潮负荷改正后南海测站精度提高了,而黄海和东海测站精度有所降低,表明在近海区域海潮负荷位移影响比较显著,并且主要影响测站的高程方向。同时,也可以分析得出 4 种全球海潮模型在黄海和东海的沿海区域还不精确,由全球海潮模型解算的海潮负荷位移并不能改善该地区测站的精度。因此,在 GPS 单天解的 mm 级定位中考虑海潮负荷位移改正时,需要使用我国近海区域海潮资料对全球海潮模型进行修正。比较 4 种海潮负荷位移改正解算的沿海测站坐标的精度,可以发现 4 种全球海潮模型在我国海域具有相同的模型精度。

对于 GPS 短周期精密定位,本文采用 FES2004 全球海潮模型分析了 14 个 IGS 站不同解算时段的垂向坐标精度,结果表明,海潮负荷效应对沿海测站垂向位移的影响要大于其对内陆区域测站的影响。大致上,越接近海边,海潮负荷位移改正对测站位置精度的提高越明显,而其对远

离海洋的内陆测站位置精度未造成影响。海潮负荷位移改正对我国沿海地区测站的精度能够提高 2.5 mm,因此,在短时高精度 GPS 定位中必须考虑海潮负荷位移改正。

参 考 文 献

- [1] Baker T F, Curits D J, Dodson A H. Ocean Tide Loading and GPS[J]. GPS World, 1995, 6(3): 54-59
- [2] Vey S, Calais E, Llubes M, et al. GPS Measurements of Ocean Loading and Its Impact on Zenith Tropospheric Delay Estimates; A Case Study in Brittany France[J]. J Geod, 2002, 76(8): 419-427
- [3] King M A, Penna N T, Clarke P J. Validation of Ocean Tide Models Around Antarctica Using On-shore GPS and Gravity Data[J]. J Geophys Res, 2005, 110: 401-412
- [4] Penna N T, Bos M S, Baker T F, et al. Assessing the Accuracy of Predicted Ocean Tide Loading Displacement Values[J]. J Geod, 2008, 82: 893-907
- [5] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modelling the Global Ocean Tides; Modern Insights from FES2004[J]. Ocean Dynamics, 2006, 56: 394-415
- [6] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Oceanic Tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19: 183-204
- [7] Lefevre F, Yard F H, Le Provost C, et al. FES99: A Global Tide Finite Element Solution Assimilating Tide Gauge and Altimetric Information[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19:

- 1 345-1 356
- [8] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/Poseidon Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56: 567-581
- [9] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads[J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1972, 10:761-797
- [10] Liu Jingnan, Ge Maorong. PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit De-termination[J]. *Wuhan University Journal of Natural Science*, 2003, 8(2B):603-609
- [11] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Data from Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33:304-315

第一作者简介:张杰,博士生,研究方向为GPS数据处理与应用。
E-mail:jiezhangwhu@163.com

Ocean Tide Loading Effect on GPS Precise Positioning

ZHANG Jie¹ LI Fei^{1,2} LOU Yidong³ HAO Weifeng²

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Ocean tide loading has a crucial geophysical effect on GPS precise positioning. Based on the theory of ocean tide loading, ocean tide loading displacements for IGS stations in China and surrounding areas resulting from four global ocean tide models are calculated, and their influences on GPS daily and sub-daily solution are analyzed and compared. For daily solution for the station, results show that ocean loading displacement corrections lead to the same RMS for the daily solution residuals with no corrections on average, but for RMSs of daily solution residuals in the vertical direction, there are changes in coastal areas, so it is believed that four ocean tide models have insufficient accuracy for the offshore area of the Yellow Sea and the East China Sea, and must be corrected by the data for the China offshore regional ocean tide. For sub-daily solutions for the stations, results show that the ocean tide loading effect decreases with the distance of the station from the sea. Particularly in coastal areas, the accuracy of the vertical coordinates of the station can be significantly improved, so ocean tide loading displacement corrections should be considered in sub-daily GPS precise positioning.

Key words: ocean tide model; ocean tide loading; precise point positioning; site displacement

About the first author: ZHANG Jie, Ph D candidate, majors in GPS data processing and application.

E-mail: jiezhangwhu@163.com