

海洋潮汐负荷对精密单点定位的影响研究

李艳红^{1,2,3}, 成芳^{1,2}, 沈朋礼^{1,2,3}, 肖厦^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院精密导航定位与授时技术重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在全球范围内选取地处内陆、沿海和岛屿的 85 个国际 GNSS 服务 (IGS) 测站, 对其一天的观测数据进行无海洋潮汐改正和加入 GOT4.8 海洋潮汐改正模型两种解算, 分析了海洋潮汐负荷对全球不同地理区域 IGS 测站精密单点定位 (PPP) 精度的影响。结果表明: 岛屿测站受海洋潮汐负荷的影响范围最广, 改正量最大。加入海洋潮汐改正后, 约 91% 的岛屿测站在 PPP 中定位误差得到了改正, 沿海测站和内陆测站得到改正的比例分别约为 85% 和 82%; 海洋潮汐改正对测站的 N 方向几乎起不到改正的作用, 对 E 方向的影响较小, 对 U 方向影响最大, 其中在岛屿测站的 U 方向上影响范围是 2~8 mm, 部分站点接近厘米级。

关键词: 海洋潮汐负荷; 精密单点定位 (PPP); IGS 测站; GOT4.8; 海洋潮汐改正

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2021)02-0025-07

0 引言

精密单点定位 (PPP) 是指使用一台全球卫星导航系统 (GNSS) 接收机的载波相位和码伪距观测值以及精密卫星轨道和钟差产品, 通过模型改正或参数估计的方法改正定位过程中的各项误差, 从而获得测站高精度坐标的一种定位方法^[1-2]。近年来 PPP 技术不断发展和完善, 能够达到厘米级甚至毫米级的定位精度^[3-4], 随着北斗卫星导航系统 (BDS) 全球组网完成, PPP 的定位精度也将会进一步提高。在 PPP 中, 地球潮汐引起测站坐标随时间的变化是重要的误差源之一^[5-7]。有研究表明^[8], 某些特殊海岸区域海水负荷效应可达到 10 cm, 因此对于精密应用, 必须考虑海洋潮汐负荷效应^[9-10]。

目前已经有多位学者对海洋潮汐负荷对 PPP 的影响进行了多方面的研究^[5, 11-13]。文献^[2]以江苏、西安区域的 GPS 站为例, 利用 NAO99b 海潮模型及 FES2004 海潮模型计算了海潮负荷对 GPS 定位以及对 GPS 基线的影响; 文献^[4]、文献^[5]分别将海洋潮汐负荷对 GPS 测站精密定位影响的理论应用于上海

和香港地区, 通过对上海和香港区域内的测站进行试验分析, 得出了海洋潮汐负荷对沿海地区测站的影响量级可达厘米级的结论; 以上学者都是基于中国某区域内的测站, 对海洋潮汐负荷在测站精密定位中的影响进行了研究和分析。试验中选取的测站所涉及的地理范围较小、数量较少, 这使所得结论具有一定的局限性, 缺乏普适性。文献^[6]研究了海洋潮汐负荷对测站位移影响的理论和方法, 但文中并没有对此理论和方法进行试验, 缺少实验支撑。

基于以上学者的研究, 本文选取 GOT4.8 海洋潮汐改正模型, 站点的选取打破了局部地区的限制, 在全球范围内选取了内陆、沿海和岛屿共计 85 个国际 GNSS 服务 (IGS) 测站, 保证了数据的充足性和结论的可靠性, 进行了三组试验, 利用海洋潮汐负荷对地处不同区域的 IGS 站点的影响进行了充分的分析比较, 得到了一些有益的结论。

1 海水负荷潮汐误差与计算

海水在日月引潮力作用下引起的海面周期性升降、涨落与进退, 导致实际海平面相对于平均海平面

收稿日期: 2020-09-04

资助项目: 王宽诚率先进入计划“产研人才扶持项目”(Y965YR1701); 北斗地基增强系统—中国第二代卫星导航系统重大专项 (Y849KF1701)

通信作者: 成芳 E-mail: chengfang@ntsc.ac.cn

表 1 静态 PPP 主要处理策略	
参数	处理策略
截止高度角/(°)	10
电离层模型	Iono-Free LC
对流层模型	Saastamoinen
星历	15 min精密星历(IGS)
钟差	30 s差产品(IGS_30 s)
模糊度解算	Continuous
海洋潮汐改正模型	GOT4.8
地球自转	IGS21047.erp
PCO、PCV改正	IGS14_1977.atx
系统组合	GPS单系统

2.3 试验分析

本文在研究中设计了三组试验,试验对象分别为

内陆 23 个测站、沿海 39 个测站和岛屿 23 个测站.对每组站加入海洋潮汐改正和不加入海洋潮汐改正的定位结果数据与测站的精确坐标进行比较得到 N、E、U 三个方向的两组误差,再对两组误差求互差,该值就表示海洋潮汐负荷对 IGS 测站 PPP 的影响.

第一组试验在全球范围内选取内陆 23 个测站,在 N、E、U 三个方向的定位结果分析如图 2 和表 2 所示.

从图 2 中可以看出,在全球范围内选取的内陆 23 个测站 PPP 误差不尽相同,在 N 方向, BJFS 测站定位误差最大,可达 0.2 m,其余测站定位误差在 0.003~0.130 m;在 U 方向, POVE 测站定位误差最大,可达 1 m,其余测站定位误差在 0.04~0.58 m;在 E 方向, BRAZ 测站定位误差最大,可达 0.24 m,其余测站定位误差在 0.02~0.18 m.从总体来看,各个测站在 U 方向误差较大,其次是 E 方向,N 方向误差最小.

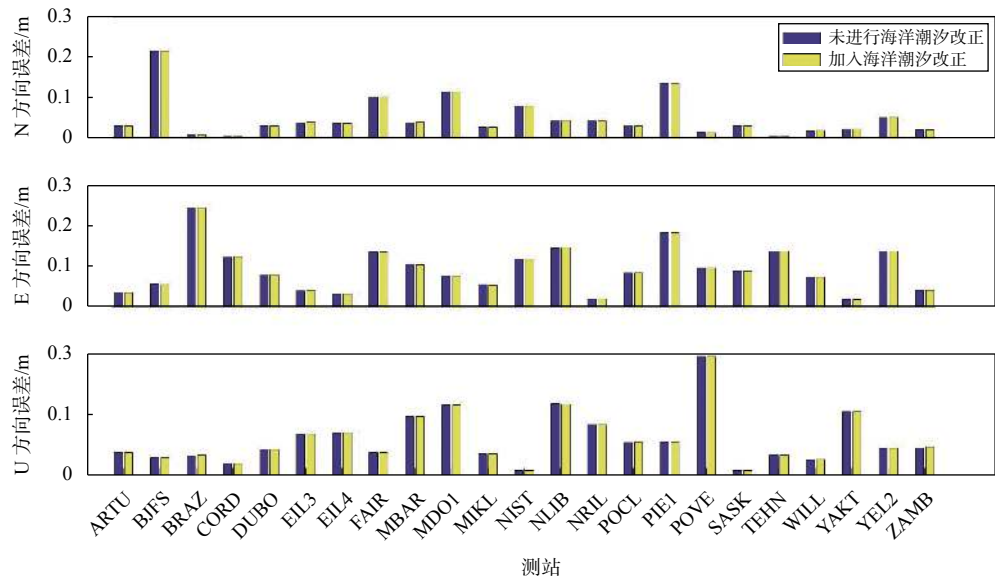


图 2 内陆 23 个测站加入潮汐改正和不加入潮汐改正 N、E、U 三方向定位误差对比

从图 2 中可以看出,内陆 23 个站点在加入潮汐改正前后在 N、E、U 三个方向的误差改正量都很小,为了更加准确地分析加入海洋潮汐改正前后对定位误差的影响,对此作了定量分析,表 2 显示了海洋潮汐负荷对内陆 23 个测站 N、E、U 三个方向定位误差的改正量,从表中我们可以看出,内陆 23 个测站加入海洋潮汐改正后,有约 82% 的站点在 N、E、U 三方向中的其中一个或两个方向的误差有改正.有极少数测站如 ARTU 和 MBAR 在 N、E、U 三方向上均未得到改正甚至定位误差变大,ZAMB 测站在 U 方向定位误差变大的现象,通过查阅大量相关文献以及对原始数据和结果数据进行分析,得出出现这一结果的原

因可能有两点:一是每日的海潮负荷改正值大小会因海水的高潮和低潮而异,测站在 N、E、U 方向改正效果与它所邻海域海水的高低潮有关,高潮时改正效果较为明显,低潮时达不到改正效果甚至使得定位精度变差^[5];二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,文中所用海潮模型在某些测站所邻海域区域还不精确,由该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,在这些地区需要采用其他的技术直接监测获取海潮负荷参数^[20].在接下来的工作中也会对海潮模型地区适用性的问题做进一步的研究.其中,海洋潮汐负荷对 U 方向影响最大,影响范围是 0.02~0.12 cm,

表 2 海洋潮汐负荷对内陆 23 个测站定位的改正量 cm

站点代号	加入海洋潮汐改正前后互差			站点代号	加入海洋潮汐改正前后互差		
	ΔN	ΔE	ΔU		ΔN	ΔE	ΔU
ARTU	0.015	0.003	0.031	NLIB	0.056	0.204	-0.180
BJFS	0.010	-0.066	0.116	NRIL	-0.026	0.022	0.133
BRAZ	0.016	0.178	0.241	PICL	-0.067	0.052	0.207
CORD	-0.007	0.065	-0.019	PIE1	-0.040	0.072	0.134
DUBO	-0.039	0.090	0.227	POVE	-0.041	0.079	-0.122
EIL3	0.093	-0.011	0.231	SASK	-0.030	0.029	0.165
EIL4	0.088	0.001	0.233	TEHN	0.030	0.010	0.161
FAIR	-0.030	-0.005	0.225	WILL	0.139	-0.023	0.289
MBAR	0.132	-0.032	-0.017	YAKT	0.019	-0.067	0.159
MDO1	-0.043	0.065	0.124	YEL2	0.009	-0.026	0.163
MIKL	-0.029	-0.056	-0.063	ZAMB	-0.072	0.001	0.575
NIST	-0.029	0.036	0.047	平均	-0.038	-0.036	-0.080

对 E 方向和 N 方向的影响差别很小, 分别在 0.005~0.070 cm 和 0.007~0.072 cm.

第二组试验在全球范围内选取沿海 39 个测站, 在 N、E、U 三个方向的定位结果分析如图 3 和表 3 所示.

从图 3 中可以得到, 在 U 方向, NKLG 测站定位误差最大达到了 4 m, 加入海洋潮汐改正前后定位误差都明显高于其他测站, 原因是该测站位于非洲中西部且在赤道附近, 通过查询当地天气得知在数据采集时段之前已连续有多天阴雨天气, 炎热潮湿的环境下, 用经验对流层延迟模型改正存在较大的大地高测量误差. 其余测站定位误差均在 0.09~0.87 m; 在 E 方向, 沿海 39 个测站中最大的定位误差是 0.33 m, 其余测站定位误差在 0.012~0.180 m; 在 N 方向最大定位误差是 0.16 m, 其他测站定位误差在 0.01~0.15 m. 这与试验一中内陆 23 个测站所得定位结果一致, PPP 中 U 方向误差最大, 其次是 E 方向, N 方向误差相对最小.

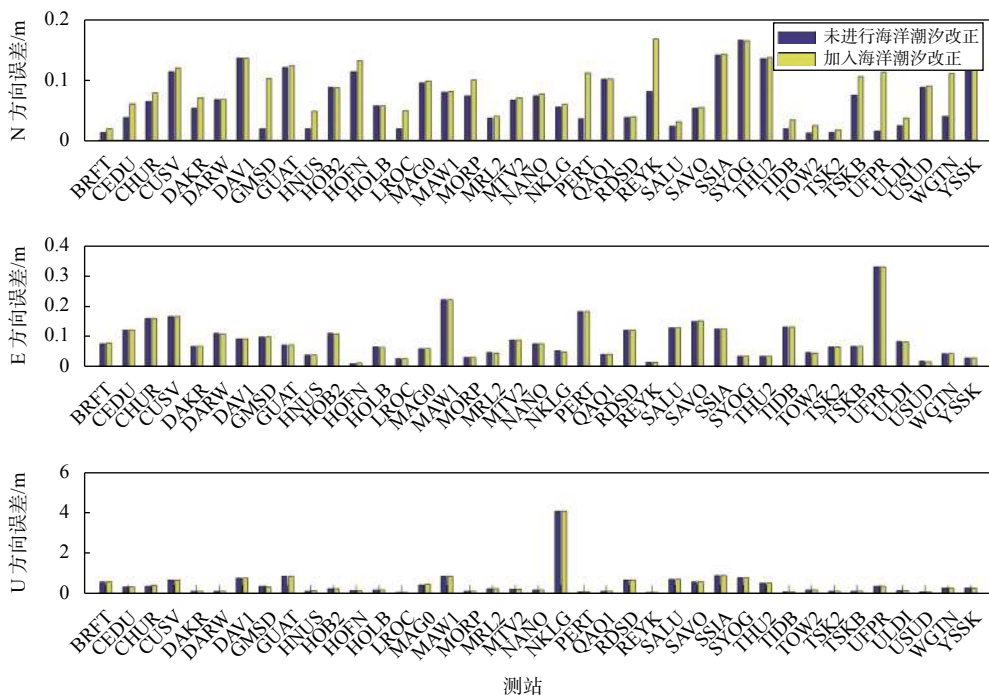


图 3 沿海 39 个测站加入潮汐改正和不加入潮汐改正 N、E、U 三方向定位误差对比

同试验一中的分析方法, 将图 3 中加入海洋潮汐改正前后定位误差进行定量分析得到表 3. 从表 3 可以看到, 在沿海 39 个测站中, 约有 85% 的测站在 N、E、U 三方向中的其中一个或两个方向的误差有改正, 沿海测站的受影响比例高于内陆测站的试验结果. 海洋潮汐负荷对 E 方向的改正量在 0.005~

0.287 cm, 对 N 方向的改正量在 0.056~0.106 cm, 但表中明显可以看出海洋潮汐负荷对沿海极少测站的 N 方向有改正, 对 U 方向的改正量在 0.049~0.662 cm, 对大多数测站在 E 方向的改正量都能达到毫米级. 可见, 海洋潮汐负荷对 U 方向影响最大, N 方向和 E 方向相对内陆测站影响较大.

表 3 海洋潮汐负荷对沿海 39 个测站定位的改正量 cm

站点代号	加入海洋潮汐改正前后互差			站点代号	加入海洋潮汐改正前后互差		
	ΔN	ΔE	ΔU		ΔN	ΔE	ΔU
BRFT	0.637	0.148	0.108	NKLG	0.384	-0.287	0.662
CEDU	2.226	0.118	-0.176	PERT	7.432	-0.079	0.130
CHUR	1.506	0.052	0.111	QAQ1	-0.056	0.043	0.221
CUSV	0.605	-0.113	0.041	RDSO	0.067	0.005	-0.251
DAKR	1.663	-0.083	0.004	REYK	8.587	-0.008	-0.049
DARW	0.021	-0.107	-0.012	SALU	0.762	-0.005	-0.319
DAV1	0.030	0.013	0.112	SAVO	0.031	0.211	0.526
GMSD	8.240	-0.138	-0.686	SSIA	0.097	0.160	-0.440
GUAT	0.342	0.133	-0.343	SYOG	-0.106	0.027	-0.056
HNUS	2.901	-0.087	0.454	THU2	0.245	0.061	-0.138
HOB2	-0.088	-0.203	0.300	TIDB	1.347	-0.081	0.191
HOFN	1.895	0.034	-0.194	TOW2	1.129	-0.069	-0.662
HOLB	0.015	-0.052	0.575	TSK2	0.477	0.032	-0.105
LROC	2.915	-0.026	-0.198	TSKB	3.107	0.013	-0.072
MAG0	0.307	0.002	0.370	UFPR	9.548	-0.073	0.137
MAW1	0.047	0.019	0.014	ULDI	1.200	-0.085	0.679
MORP	2.631	-0.035	-0.469	USUD	0.185	-0.069	-0.179
MRL2	0.270	-0.211	0.152	WGTN	7.022	0.156	-0.228
MTV2	0.390	0.050	0.181	YSSK	2.310	-0.006	0.053
NANO	0.329	-0.095	0.311	平均	-0.083	-0.091	-0.254

第三组试验在全球范围内选取岛屿 23 个测站,在 N、E、U 三个方向的定位结果分析如图 4 和表 4 所示。

图 4 显示,岛屿 23 个测站的 PPP 定位误差最大的是 U 方向,在 0.03~1.12 m,其次是 E 方向,误差在 0.02~0.20 m,N 方向误差最小,在 0.008~0.150 m.加入海洋潮汐改正前后各个方向的误差有不同程度改正,表 4 显示了利用加入海洋潮汐改正前后误差的互差及各个方向的误差改正量.从中可以看出,岛屿 23 个测站中,在 N、E、U 三方向中的其中一个或两个方向的误差有改正的测站达到了约 91%,其中,N 方向的改正量在 0.023~0.042 cm,但对大多数测站的 N 方向并没有起到改正的作用,这与沿海测站试验结果一致;在 E 方向的改正量范围是 0.008~0.293 cm;在 U 方向改正量范围是 0.173~0.798 cm,各个测站改正量均达到了毫米级,明显高于 N、E 方向。

与内陆测站和沿海测站相比较可见,在影响范围上,海洋潮汐负荷对岛屿测站的影响范围更广,受影响的岛屿测站、沿海测站和内陆测站的比例分别约为 91%、85% 和 82%;在影响程度上,岛屿测站在 N、E、U 方向上的改正量均大于沿海测站和内陆测站,并且三个不同区域的测站试验结果均表明海洋潮汐负荷对 U 方向的影响最大,其次是 E 方向,对 N 方向几乎起不到改正的作用,并且多数测站在加入海洋

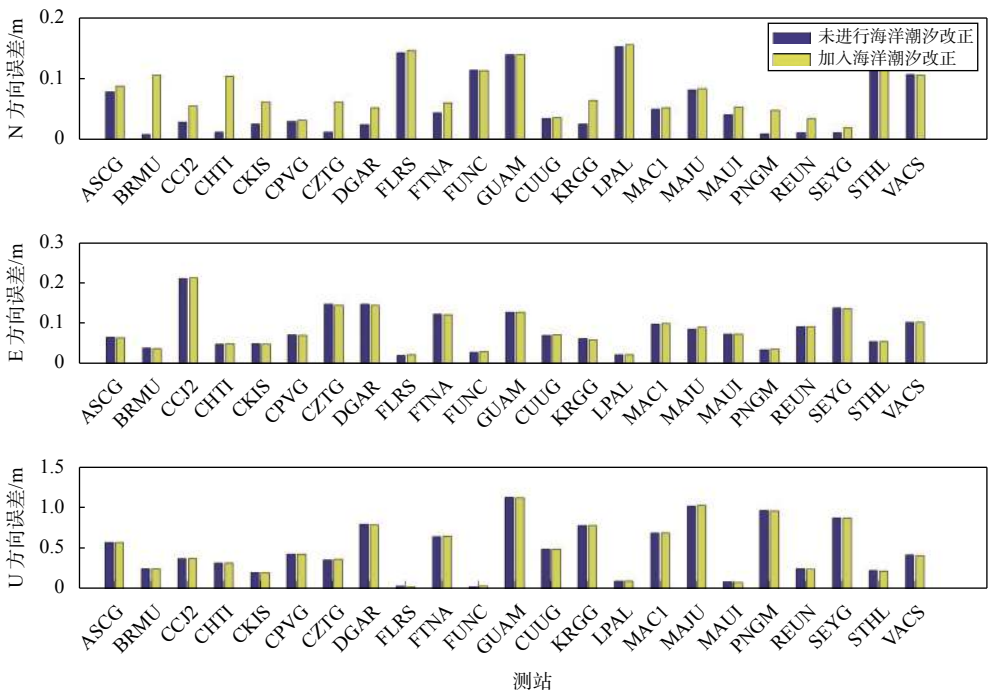


图 4 岛屿 23 个测站加入潮汐改正和不加入潮汐改正 N、E、U 三方向定位误差对比

表4 海洋潮汐负荷对岛屿23个测站定位的改正量 cm

站点代号	加入海洋潮汐 改正前后互差			站点代号	加入海洋潮汐 改正前后互差		
	ΔN	ΔE	ΔU		ΔN	ΔE	ΔU
ASCG	0.899	-0.154	0.371	GUUG	0.172	0.097	-0.322
BRMU	9.739	-0.215	0.173	KRGG	3.769	-0.293	0.226
CCJ2	2.649	0.074	-0.226	LPAL	0.311	0.032	-0.456
CHTI	9.141	0.146	-0.466	MAC1	0.158	0.111	0.347
CKIS	3.525	-0.118	0.155	MAJU	0.147	0.363	1.314
CPVG	0.227	-0.176	-0.173	MAUI	1.211	-0.082	-0.629
CZTG	4.859	-0.273	0.547	PNGM	3.800	0.122	-0.246
DGAR	2.785	-0.268	-0.513	REUN	2.299	-0.008	-0.263
FLRS	0.344	0.261	-0.586	SEYG	0.754	-0.047	-0.434
FTNA	1.625	-0.119	0.952	STHL	0.187	-0.086	-0.798
FUNC	-0.042	0.166	0.380	VACS	-0.032	0.035	-0.393
GUAM	-0.023	-0.029	-0.414	平均	-0.032	-0.144	-0.423

潮汐改正后 N 方向误差变大,这一结果在沿海测站和岛屿测站的试验中表现得更明显。

3 结束语

本文分析研究了海洋潮汐负荷对全球内陆、沿海和岛屿三种不同的地理区域 IGS 测站 PPP 精度的影响。试验结果表明,海洋潮汐负荷对 PPP 定位误差的影响与站点所处的区域有关,岛屿测站受海洋潮汐负荷的影响范围最广,改正量最大。加入海洋潮汐改正后,约 91% 的岛屿测站在 PPP 中定位误差得到了改正,沿海测站和内陆测站得到改正的比例分别约为 85% 和 82%;海洋潮汐改正对测站的 N 方向几乎起不到改正的作用,对 E 方向影响较小,对 U 方向影响最大,其中在岛屿测站的 U 方向上影响范围是 2~8 mm,部分站点接近厘米级。

本文研究中仅对选取的全球 85 个 IGS 测站单系统一天的观测数据进行了处理和分析。在接下来的研究中将会延长试验数据的时长、增加系统组合,对测站多系统观测数据进行月分析和年分析,对本文中的结论做进一步的验证和完善。

参考文献

- [1] 张小红,李星星,李盼. GNSS精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
- [2] 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]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(5): 108-112.

- [3] ANDERSEN O B. Ocean tides in the northern north-Atlantic and adjacent seas from ERS-1 altimetry[J]. *Journal of geophysical research-oceans*, 1994, 99(C11): 557-573. DOI: 10.1029/94JC01433
- [4] 丁倩云,孙宪坤,尹玲,等. 近海潮汐效应对上海地区精密定位的影响[J]. 全球定位系统, 2018, 43(3): 32-38.
- [5] 赵红,张勤,徐超,等. 潮汐效应对香港地区GPS PPP的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(1): 6-10.
- [6] 张捍卫,郑勇,赵方泉. 海洋负荷潮汐对测站位移影响的理论研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(1): 69-73.
- [7] XU G C. GPS理论、算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [8] 肖亮明,蒋胜华. 潮汐对精密单点定位的影响[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(1): 19-21.
- [9] 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, 38(12): 1400-1404.
- [10] 朱千章. 潮汐及环境负荷对GPS高程影响的研究[J]. 城市勘测, 2009(2): 75-78.
- [11] 邹璇,姜卫平. 潮汐改正对精密GPS基线解算的影响[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(1): 6-8.
- [12] 李婧,李潭欣. 海潮负荷对中国区域CORS站点精密定位影响[J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 75-77, 82.
- [13] 臧建飞,范士杰,易昌华,等. 实时精密单点定位的远海实时GPS潮汐观测[J]. 测绘科学, 2017, 42(6): 155-160.
- [14] 刘焱雄,周兴华,张卫红,等. GPS精密单点定位精度分析[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 44-46.
- [15] 李博峰,葛海波,沈云中. 无电离层组合、UOFC和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 734-740.
- [16] 李浩军,王解先,陈俊平,等. 基于GNSS网络的实时精密单点定位及精度分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1302-1307.
- [17] 赵文娇,党亚民,成英燕,等. 海洋潮汐及其参数选取方法对GPS基线解算精度的影响分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(2): 42-45.
- [18] 冯梓航. 基于精密单点定位技术的海潮负荷位移反演研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [19] 刘辛中. 基于GPS测定海洋分潮方法研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013.
- [20] 梁寅,李星星,畅毅,等. 静态精密单点定位的精度和收敛性分析[J]. 测绘工程, 2010, 19(2): 32-34.

作者简介

李艳红 (1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为卫星精密导航定位技术。

成芳 (1981—),女,副研究员,主要研究方向
为卫星导航增强系统关键技术及应用解决方案.

沈朋礼 (1992—),男,博士研究生,主要研究
方向为 GNSS 数据处理和实时定位算法.

Study on the influence of ocean tidal load on precise point positioning

LI Yanhong^{1,2,3}, CHENG Fang^{1,2}, SHEN Pengli^{1,2,3}, XIAO Xia^{1,2}

(1. *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;*

2. *Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese
Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: A total of 85 IGS stations located inland, on the coast and on the islands are selected from around the world, and the position of these stations are solved by considering adding the global ocean tide model (GOT4.8) or not. The effect of ocean tidal load on the precise point positioning (PPP) accuracy of IGS stations in different geographical regions is analyzed and studied. The results show that ocean tidal load has the greatest impact on the station located on the island. After adding the ocean tide correction, about 91% of the positioning error of the island stations are improved, and the proportions of coastal stations and inland stations are about 85% and 82%, respectively. The ocean tide correction has almost no impact on the N direction of the station, and has little impact on the E direction, and has the greatest positive impact on the U direction. Among them, the impact range in the U direction of the island station is 2~8 mm, and that of some stations are close to the centimeter level.

Keywords: ocean tidal load; precise point positioning (PPP); IGS stations; GOT4.8; ocean tide correction