

# 利用 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 高度计数据提取中国南海潮汐信息

付延光<sup>1</sup> 周兴华<sup>1,2</sup> 许 军<sup>3</sup> 刘森波<sup>2</sup> 杨 磊<sup>2</sup>

1 山东科技大学测绘科学与工程学院,山东 青岛,266590  
2 国家海洋局第一海洋研究所,山东 青岛,266061  
3 海军大连舰艇学院海洋测绘系,辽宁 大连,116018

**摘 要:**基于 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 卫星高度计 16 a 原始轨道、6 a 变轨轨道数据,利用同步观测期间测高数据计算中国南海海域的系统偏差,生成基于 TOPEX/Poseidon 高度计平均海面的统一潮高时间序列,按纬差 0.1°间隔提取原始轨道 2 184 个正常点和变轨轨道 1 626 个正常点,分别对原始轨道、变轨轨道逐正常点进行调和分析及响应分析,各得到 8 个分潮( $Q_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$  和  $K_2$ )调和常数。利用交叉点处升轨、降轨不符值评估潮汐参数的稳定性,结果表明,变轨轨道交叉点处误差相对较大,多分潮总体综合预报误差 RSS 值为 7.28 cm。通过与全球海潮模型比较表明,该结果与海潮模型在中国南海开阔海域精度表现一致,在半封闭浅水海域差异较大;与验潮站结果进行比较发现,受中国南海复杂的潮波系统、与测高星下点距离等因素影响,中国南海北部海域 RSS 值较大,海潮模型结果在  $M_2$  分潮单分潮预报中误差 RMS 值较大,为 13.64 cm,其余分潮均在 10 cm 内。

**关键词:**卫星测高;南海;调和分析;响应分析;调和常数  
**中图分类号:**P229 **文献标志码:**A

卫星测高技术的出现推动了学者们对全球海洋潮汐的研究<sup>[1-3]</sup>。高度计数据的不断丰富对应用卫星高度计数据进行高精度的海洋潮汐信息提取提出了更高的要求。中国南海海域的潮波运动表现十分复杂<sup>[4]</sup>,采用卫星高度计数据对中国南海海域潮汐信息进行研究具有重要的科学意义和研究价值。

Yanagi 等<sup>[5-6]</sup>、赵云霞等<sup>[7]</sup>分别采用 3 a、6 a 的 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)高度计数据进行潮汐信息提取;暴景阳等<sup>[8-10]</sup>采用 T/P 高度计不同时段的数据对中国南海海域交叉点潮汐信息进行研究;汪一航<sup>[11]</sup>利用 16 a 的 T/P、Jason-1 原始轨道数据进行调和分析。在处理变轨轨道数据方面,王延强等<sup>[12]</sup>、仲昌维等<sup>[13]</sup>分别采用 18.6 a 和 19 a 的 T/P 系列高度计数据(其中采用变轨轨道数据分别为 3 a 和 6 a)进行潮汐分析,两者采

用的数据分析方法均为调和分析法,而理论上,分辨  $K_2$  与  $P_1$  分潮需要 9.18 a 的高度计资料<sup>[14]</sup>,6 a 的变轨轨道数据可能无法完全分离。李培良等<sup>[15]</sup>利用 6 a 的 T/P 高度计数据,基于响应分析法提取了 6 个分潮  $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$  和  $N_2$  的潮汐参数;暴景阳等<sup>[16]</sup>提出以法方程条件数作为分潮可分辨的新判据,通过仿真模拟,认为沿迹响应分析法仅需 2 a 的 T/P 高度计数据就能提取较可靠的潮汐参数,并基于高度计数据对此进行了验证。

本文建立了 T/P、Jason-1 卫星高度计基准统一的潮高时间序列,并采用沿迹调和分析法及响应分析法分别对原始轨道、变轨轨道数据进行潮汐信息的提取,对交叉点处升轨、降轨提取潮汐参数的稳定性进行检验。选取中国南海海域周边距离卫星轨迹星下点较近的 27 个长期验潮站资料和 3 个全球潮汐模型(DTU10、OSU12 和

TPX07.2)对 8 个主要分潮的精度进行评估。

1 数据与分析方法

1.1 数据资料

本文研究范围为 0°~26°N,99°~121°E,图 1 为 T/P、Jason-1 高度计在中国南海海域的轨迹分布,实线表示原始轨迹分布,虚线表示变轨轨迹分布。高度计数据采用美国国家航空和宇宙航行局(NASA)喷气推进实验室的 T/P 高度计 MGDR-B 数据与法国空间局国家研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)的 Jason-1 高度计 GDR-C 数据。

选取中国南海海域周边距离高度计星下点不大于 120 km 的 27 个长期验潮站资料,数据采样时间间隔为 1 h,具有 1 a 及以上潮高时间序列,图 1 中三角形表示验潮站位置。同时选取 3 个全球海洋潮汐模型(DTU10、OSU12 和 TPX07.2),其空间分辨率分别为 0.125°×0.125°、0.25°×0.25°和 0.25°×0.25°。

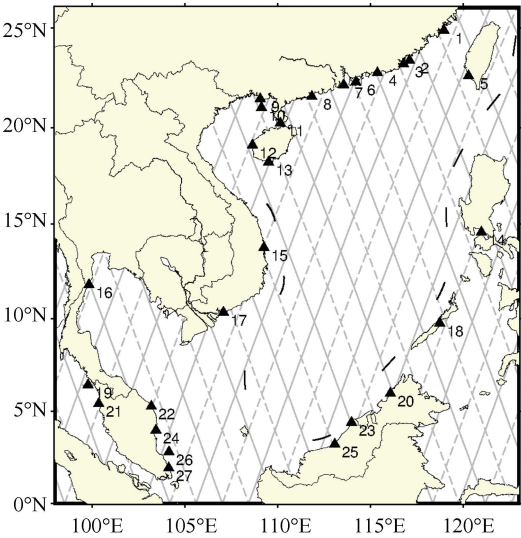


图 1 T/P 和 Jason-1 高度计卫星的海面轨迹分布  
Fig.1 The Trajectory Distribution of T/P and Jason-1 Satellite Altimeter in the Sea Surface

1.2 测高数据处理及潮汐分析

测高数据处理主要包含潮高计算和轨迹正常点的计算两方面。其中,潮高计算主要以平均海面作为基准面,对测高数据实施除海潮改正外的其他各项改正<sup>[16]</sup>。轨迹正常点的计算主要采用沿迹纬差 0.1°间隔的方式,对潮高采用最小二乘拟合计算,经度取所有周期重复点的经度平均值。

同步观测期间 T/P 周期范围是 344~364 周,Jason-1 的周期范围是 001~021 周,对应时间

范围是 2002-01—2002-08,计算在同步观测期间 T/P 与 Jason-1 高度计在中国南海海域的平均潮高值,得到其系统偏差为 5.91 cm。同步观测期间提取的 T/P 与 Jason-1 高度计的潮高偏差存在一定地域差异,其中两者偏差最大值为 9.57 cm,最小值为 0.27 cm。本文将 Jason-1 高度计正常点处潮高减去 5.91 cm,建立统一基于 T/P 高度计平均海面的潮高时间序列。

实际海洋中,潮高通常表示为:

ζ(t)=A\_0+∑\_{i=1}^nf\_iH\_i cos[δ\_i t+(V\_0+u)-g\_i]+x(t) (1)

式中,A<sub>0</sub>为分析期间的平均海面;t为区时;f<sub>i</sub>为分潮交点因子;δ<sub>i</sub>为分潮的角速率;(V<sub>0</sub>+u)为格林威治零时的平衡潮初相角;x(t)是非天文潮位,具有随机的特性,在物理学上称为噪音;H<sub>i</sub>为分潮的平均振幅;g<sub>i</sub>为区时专用迟角。H<sub>i</sub>、g<sub>i</sub>为待定的潮汐调和常数。本文对长期验潮站资料以及原始轨道正常点采用调和分析<sup>[17]</sup>,对变轨轨道正常点采用响应分析<sup>[15]</sup>,得到 4 个全日分潮(Q<sub>1</sub>、O<sub>1</sub>、P<sub>1</sub>和K<sub>1</sub>)和 4 个半日分潮(N<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>和K<sub>2</sub>)的调和常数。

1.3 精度指标

本文主要采用单分潮预报中误差(RMS)和多分潮总体综合预报误差(RSS)对潮汐调和常数进行精度分析:

RMS={1/N∑\_{m=1}^N1/2[(H\_0 cosG\_0-H\_m cosG\_m)^2+(H\_0 sinG\_0-H\_m sinG\_m)^2]}^{1/2} (2)

RSS=(∑\_{j=1}^M RMS\_j^2)^{1/2} (3)

式中,N是比较点的个数;H<sub>0</sub>和G<sub>0</sub>分别是本文结果或海潮模型分潮的振幅和迟角;H<sub>m</sub>和G<sub>m</sub>分别是验潮站结果对应分潮的振幅和迟角;M是分潮个数。

2 结果分析

2.1 内符合精度分析

为验证提取潮汐参数的稳定性,将测高卫星原始轨道 22 个交叉点、变轨轨道 23 个交叉点以及原始轨道与变轨轨道 45 个交叉点处升轨与降轨提取的 4 个最主要分潮(O<sub>1</sub>、K<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>)的振幅和迟角进行比较,将上升轨道结果作为 x 轴,下降轨道结果作为 y 轴,计算两者的线性函数和相关系数,并进行相关性分析,统计结果见表 1、

表 2 和表 3,表中  $H$ 、 $G$  分别表示分潮振幅、迟角。由表 1 可知,原始轨道交叉点处升轨、降轨分别提取的分潮调和常数相关系数达到 98% 以上;振幅中误差均小于 2 cm,其中  $K_1$  分潮最大为 1.5 cm;迟角中误差均小于  $6^\circ$ ,其中  $S_2$  分潮最大为  $5.5^\circ$ ,具有很好的一致性。结果表明,采用长达 16 a 的高度计数据进行潮汐信息提取的结果在精度方面具有绝对的优势。

表 1 原始轨道交叉点处升轨、降轨分潮结果比较

| Tab.1 Tidal Constituents Comparison of Ascending and Descending Rail in the Junction of Original Orbit |                     |      |      |        |     |                  |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------|------|--------|-----|------------------|-------|
| 分潮                                                                                                     | 分潮参数                | 最大偏差 | 最小偏差 | 平均绝对误差 | 中误差 | 线性函数             | 相关系数  |
| $O_1$                                                                                                  | $H/\text{cm}$       | 0.7  | 0.1  | 0.2    | 1.0 | $y=1.001x-0.140$ | 0.997 |
|                                                                                                        | $G/(\text{^\circ})$ | 3.7  | 0.0  | 0.6    | 2.1 | $y=1.040x-0.856$ | 0.999 |
| $K_1$                                                                                                  | $H/\text{cm}$       | 1.5  | 0.1  | 0.3    | 1.5 | $y=0.986x+0.607$ | 0.997 |
|                                                                                                        | $G/(\text{^\circ})$ | 3.9  | 0.2  | 0.7    | 3.3 | $y=1.008x-2.536$ | 0.999 |
| $M_2$                                                                                                  | $H/\text{cm}$       | 1.2  | 0.2  | 0.3    | 0.7 | $y=1.054x-0.845$ | 0.995 |
|                                                                                                        | $G/(\text{^\circ})$ | 3.2  | 0.1  | 0.8    | 4.7 | $y=1.006x-1.901$ | 0.999 |
| $S_2$                                                                                                  | $H/\text{cm}$       | 0.6  | 0.0  | 0.2    | 0.6 | $y=0.985x+0.162$ | 0.989 |
|                                                                                                        | $G/(\text{^\circ})$ | 10.8 | 0.1  | 1.9    | 5.5 | $y=0.996x+0.089$ | 0.999 |

表 2 变轨轨道交叉点处升轨、降轨分潮结果比较

| Tab.2 Tidal Constituents Comparison of Ascending and Descending Rail in the Junction of Interleaved Orbit |                     |       |      |        |      |                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|------|--------|------|-------------------|-------|
| 分潮                                                                                                        | 分潮参数                | 最大偏差  | 最小偏差 | 平均绝对误差 | 中误差  | 线性函数              | 相关系数  |
| $O_1$                                                                                                     | $H/\text{cm}$       | 4.4   | 0.0  | 1.4    | 2.0  | $y=1.006x+0.372$  | 0.984 |
|                                                                                                           | $G/(\text{^\circ})$ | 7.7   | 0.2  | 2.4    | 2.9  | $y=1.013x-2.718$  | 0.998 |
| $K_1$                                                                                                     | $H/\text{cm}$       | 9.8   | 0.7  | 4.5    | 5.1  | $y=0.853x+6.065$  | 0.867 |
|                                                                                                           | $G/(\text{^\circ})$ | 26.7  | 0.6  | 9.0    | 10.6 | $y=1.020x-2.749$  | 0.978 |
| $M_2$                                                                                                     | $H/\text{cm}$       | 5.6   | 0.1  | 2.0    | 2.6  | $y=1.045x-1.288$  | 0.992 |
|                                                                                                           | $G/(\text{^\circ})$ | 26.6  | 0.4  | 6.9    | 10.0 | $y=0.971x+7.864$  | 0.989 |
| $S_2$                                                                                                     | $H/\text{cm}$       | 6.4   | 0.2  | 1.7    | 2.1  | $y=0.921x+0.918$  | 0.956 |
|                                                                                                           | $G/(\text{^\circ})$ | 335.6 | 0.3  | 11.0   | 13.6 | $y=0.812x+49.885$ | 0.723 |

表 3 原始轨道与变轨轨道交叉点处分潮结果比较

| Tab.3 Tidal Constituents Comparison Results in the Junction of Original and Interleaved Orbits |                     |      |      |        |      |                  |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------|------|--------|------|------------------|-------|
| 分潮                                                                                             | 分潮参数                | 最大偏差 | 最小偏差 | 平均绝对误差 | 中误差  | 线性函数             | 相关系数  |
| $O_1$                                                                                          | $H/\text{cm}$       | 3.9  | 0.0  | 1.1    | 1.4  | $y=0.932x+1.507$ | 0.978 |
|                                                                                                | $G/(\text{^\circ})$ | 55.8 | 0.0  | 3.3    | 8.7  | $y=0.983x+6.295$ | 0.987 |
| $K_1$                                                                                          | $H/\text{cm}$       | 7.1  | 0.2  | 2.3    | 2.8  | $y=0.916x+2.757$ | 0.891 |
|                                                                                                | $G/(\text{^\circ})$ | 40.3 | 0.4  | 3.7    | 7.0  | $y=1.002x-1.981$ | 0.994 |
| $M_2$                                                                                          | $H/\text{cm}$       | 5.7  | 0.1  | 1.1    | 1.5  | $y=0.975x+0.534$ | 0.981 |
|                                                                                                | $G/(\text{^\circ})$ | 18.2 | 0.1  | 3.9    | 5.6  | $y=0.997x+0.598$ | 0.997 |
| $S_2$                                                                                          | $H/\text{cm}$       | 3.8  | 0.0  | 1.1    | 1.4  | $y=0.998x+0.130$ | 0.963 |
|                                                                                                | $G/(\text{^\circ})$ | 73.7 | 0.3  | 11.7   | 17.3 | $y=0.966x+7.883$ | 0.981 |

由表 2 可知,变轨轨道交叉点处升、降轨分潮振幅中误差均小于 6 cm,其中  $K_1$  分潮最大为 5.1 cm;迟角中误差较大,其中  $S_2$  分潮最大为  $13.6^\circ$ 。通过与原始轨道结果相比可以看出,变轨轨道提取的调和常数相关性较差, $S_2$  分潮迟角相关性系数为 72.3%。主要是在交叉点处升轨、降轨的分潮迟角分别为  $17^\circ$ 、 $353.6^\circ$ ,在本文数据处理过程中,两者按照  $335.6^\circ$  的偏差进行线性拟合,导致拟合的线性函数存在较大截距,从而影响精度。若按  $24.4^\circ$  偏差进行拟合,可得到两者相关系数为 98.1%。变轨轨道进行响应分析得到的分潮结果精度较差主要是因为变轨轨道高度计数据时间序列较短。

由表 3 可知,原始轨道与变轨轨道交叉点处分潮振幅中误差均小于 3 cm,其中  $K_1$  分潮最大为 2.8 cm;分潮迟角中误差最大的是  $S_2$  分潮,为  $17.3^\circ$ 。由表 3 中最大偏差可知,分潮振幅最大偏差在 8 cm 内,具有较强的稳定性;而  $O_1$ 、 $K_1$  和  $S_2$  分潮迟角最大偏差分别为  $55.8^\circ$ 、 $40.3^\circ$  和  $73.7^\circ$ ,但其平均绝对误差分别为  $3.3^\circ$ 、 $3.7^\circ$  和  $11.7^\circ$ ,且 3 个分潮相关性系数均在 98% 以上,这主要是因为部分交叉点受高度计数据质量较差或位于浅海海域等因素影响,由原始轨道、变轨轨道分别提取的分潮调和常数相差较大,从而影响整体精度。

对 8 个主要分潮( $Q_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$  和  $K_2$ ) 的 RMS 值和 RSS 值进行计算,结果列

于表 4。由表 4 可知,原始轨道交叉点处 8 个主要分潮 RMS 值为 0.19~0.47 cm,变轨轨道交叉点为 0.56~5.53 cm,原始轨道与变轨轨道交叉点为 1.00~2.54 cm,变轨轨道分潮结果的精度略低于原始轨道分潮结果的精度,三者 RSS 值分别为

表 4 交叉点处主要分潮的预报误差/cm

Tab.4 Major Tidal Constituents Prediction Errors in the Junction Points/cm

| 交叉点       | RMS   |       |       |       |       |       |       |       | RSS  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|           | $Q_1$ | $O_1$ | $P_1$ | $K_1$ | $N_2$ | $M_2$ | $S_2$ | $K_2$ |      |
| 原始轨道      | 0.21  | 0.32  | 0.21  | 0.47  | 0.19  | 0.35  | 0.22  | 0.24  | 0.82 |
| 变轨轨道      | 1.19  | 1.76  | 1.74  | 5.53  | 1.70  | 2.85  | 1.88  | 0.56  | 7.28 |
| 原始轨道与变轨轨道 | 1.10  | 1.47  | 1.07  | 2.54  | 1.34  | 1.53  | 1.43  | 1.00  | 4.26 |

2.2 外符合精度分析

为验证提取潮汐信息的可靠性,本文将 3 个全球海洋潮汐模型 DTU10<sup>[18]</sup>、OSU12<sup>[19]</sup> 和 TPXO7.2<sup>[20-21]</sup> 以及研究区域内 27 个长期验潮站分潮结果与本文结果进行比较。

图 2 为本文结果及 3 个海潮模型通过插值到卫星轨迹正常点得到的  $M_2$  分潮振幅和迟角分布图。由图 2 可以看出,本文结果与海潮模型在中国南海开阔海域具有一致的精度表现,而在中国

北部湾、泰国湾等半封闭海域以及中国台湾海峡等浅水海域具有较大差异,如在星下点(23.1°N, 119.4°E)处,本文结果及 DTU10、OSU12 和 TPXO7.2 的振幅分别为 38.5 cm、35.84 cm、22.28 cm和 49.83 cm,迟角分别为84.43°、75.77°、52.21°和 91.13°。为进一步分析提取潮汐参数的精度,将本文结果及模型结果分别与验潮站结果 8 个主要分潮进行比较,各站 RSS 值见图 3。

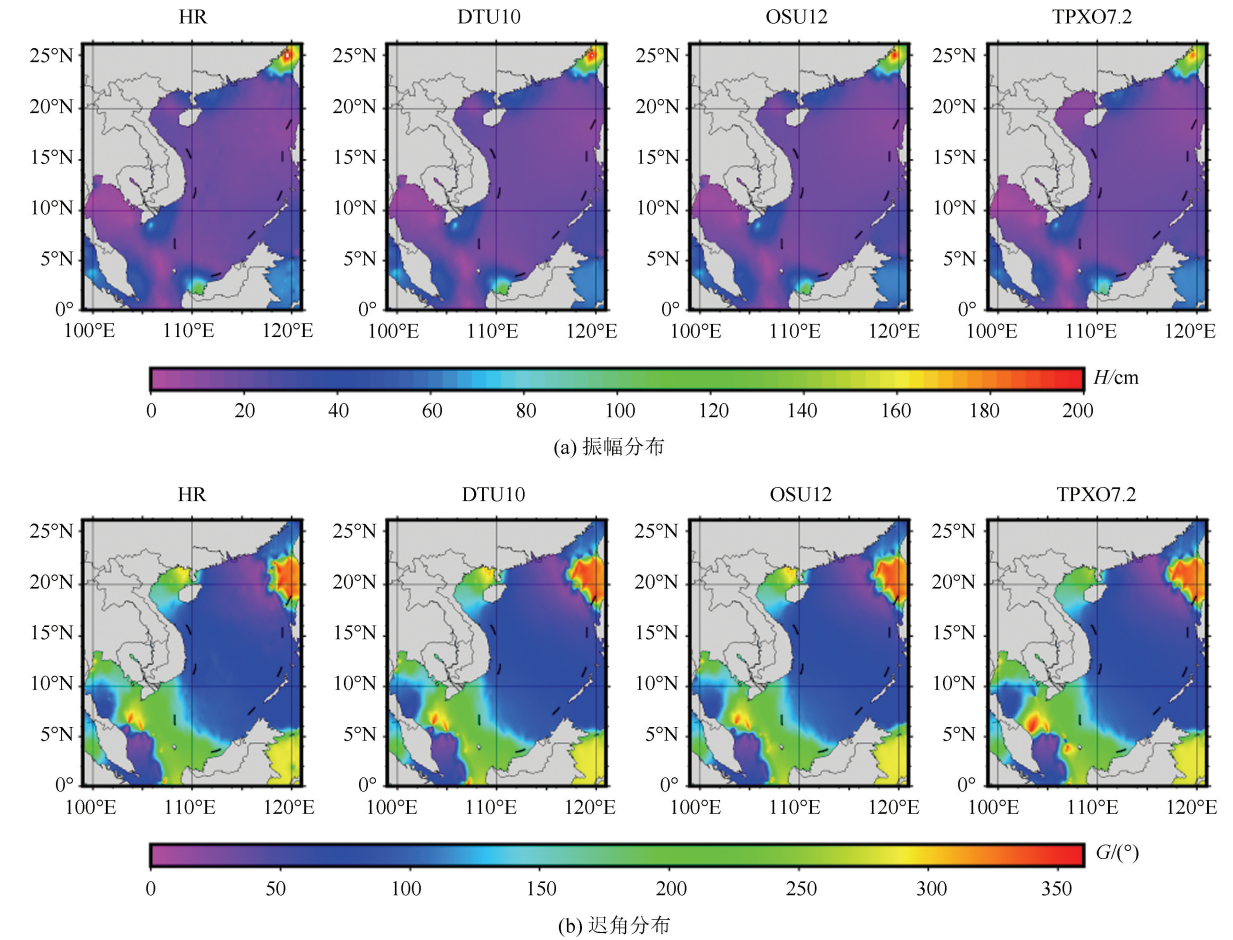


图 2 本文结果(HR)及海潮模型  $M_2$  分潮振幅和迟角分布

Fig.2 Amplitude and Phase Distribution of  $M_2$  Tidal Constituent Estimated by HR and Tide Models



将研究海域按照纬度划分为南、北两部分,其中 1~13 号验潮站位于中国南海北部(纬度为 15°~26°N),14~27 号验潮站位于中国南海南部(纬度为 0°~15°N)。由图 3 可以看出,中国南海北部验潮站中除 4 号、5 号和 12 号验潮站外,其余站 RSS 值均在 10 cm 以上;而中国南海南部验潮站中除 13 号、17 号、19 号和 21 号验潮站外,其余均在 10 cm 以下(多数在 5 cm 以下),表现出中国南海南部精度较高。

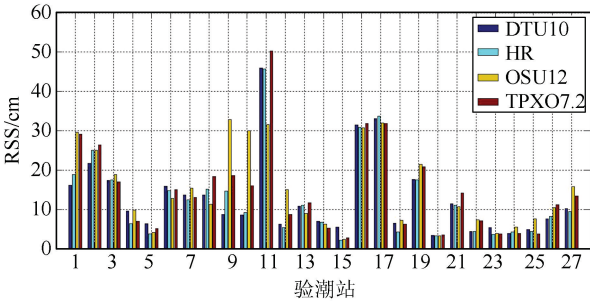


图 3 与验潮站结果比较的 8 个主要分潮的 RSS 值  
Fig.3 Eight Major Tidal Constituents RSS Values Compared with Tide Gauge Result

事实上,中国南海潮波主要由太平洋经吕宋海峡传入,同时中国南海的潮波系统通过北面的中国台湾海峡、南面的卡里马塔海峡分别与东海和印尼潮波系统发生相互作用。在中国南海北部,4 号、5 号和 12 号验潮站模型结果平均 RSS 值分别为 8.18 cm、4.87 cm 和 8.82 cm,这主要是因为 4 号和 12 号验潮站与星下点距离较近,分别为 36.12 km 和 12.68 km,而 5 号验潮站位于中国台湾岛南部,该海域面向深海区,因此弱化了潮波系统的影响。另外,本文结果与海潮模型在 9 号和 10 号验潮站处 RSS 值具有较大差异,9 号分别为 8.77 cm、14.71 cm、32.83 cm 和 18.63 cm,10 号分别为 8.54 cm、9.25 cm、30.03 cm 和 16.03 cm;在 11 号验潮站各结果 RSS 值达到最大,分别为 45.93 cm、45.70 cm、31.56 cm 和 50.33 cm。结合图 1 可以看出,9 号、10 号和 11 号验潮站均位于中国北部湾,其中 11 号验潮站距离星下点 111.57 km,中国北部湾属于半封闭海域,且水深较浅,具有较大的变化梯度,从而导致不同的海潮模型差异较大。在中国南海南部,17 号验潮站平均 RSS 值为 32.68 cm,主要是因为与星下点距离较远,为 86.94 km;16 号验潮站位于泰国湾,19 号和 21 号位于马六甲海峡,均属于半封闭海域,其平均 RSS 值分别为 31.25 cm、19.33 cm 和 11.86 cm,与星下点距离分别为 15.53 km,88.98 km 和 98.58 km,可以看出,此时精度与距离表现

出一定的偶然性。由以上分析可知,海潮模型在浅海海域的精度受潮波系统、水深变化等多方面因素的影响,对于面向开阔海域的浅水区,不同的海潮模型能够获得稳定可靠的分潮精度但具有地域差异性,而对于封闭或半封闭海域的浅水区,不同的海潮模型之间精度差异较大,且精度较差。

图 4 是本文结果与海潮模型在验潮站处 8 个主要分潮的 RMS 值。可以看出,海潮模型 DTU10 与本文结果最为接近,TPXO7.2 在  $M_2$  分潮 RMS 值较大,其余分潮与本文结果类似,OSU12 在  $Q_1$ 、 $O_1$  和  $S_2$  分潮具有相对较差的精度表现。本文结果与 DTU10、OSU12 和 TPXO7.2 在  $M_2$  分潮处 RMS 值均达到最大,分别为 10.78 cm、11.14 cm、12.40 cm 和 13.61 cm,其余分潮均在 10 cm 内,其中  $O_1$  分潮在 8 cm 以上, $K_1$  和  $S_2$  分潮在 4 cm 以上,其余分潮在 3 cm 以内。

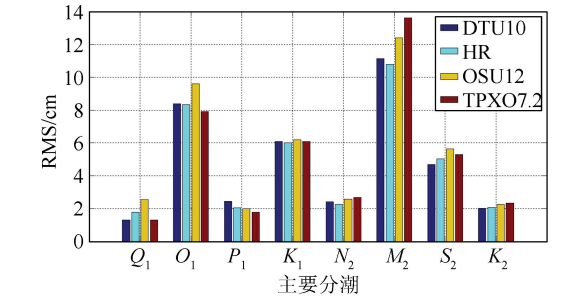


图 4 本文结果与海潮模型在验潮站处各分潮 RMS 值  
Fig.4 Each Tidal Constituent RMS Value Compared with the Ocean Tide Models

3 结 语

本文对中国南海 0°~26°N,99°~121°E 海域范围,采用 T/P、Jason-1 卫星高度计原始轨道 16 a 观测数据与变轨轨道 6 a 观测数据进行数据预处理得到海面沿迹点潮高,并计算同步观测期间两者系统偏差,建立统一于 T/P 高度计平均海面的时间序列,采用纬差 0.1°间隔沿迹分析获得 2 184 个原始轨道正常点与 1 626 个变轨轨道正常点,并分别进行调和与分析响应分析,得到 8 个主要分潮的调和常数。

采用交叉点处升、降轨不符值对提取的潮汐参数进行分析,结果表明,交叉点处调和常数具有较高的相关性,振幅最大偏差在 8 cm 之内,部分迟角偏差变化较大,3 种类型轨迹交叉点 RSS 值分别为 0.82 cm、7.28 cm、4.26 cm,表明在研究区域交叉点处升轨与降轨分别提取的潮汐结果符合较好。

本文结果联合3个海潮模型(DTU10、OSU12和TPX07.2)与中国南海周边27个长期验潮站结果比较发现,DTU10与本文结果最为吻合,OSU12精度相对较差。受中国南海复杂潮波系统、验潮站点与星下点距离等因素的影响,中国南海北部在验潮站处结果相比南部较差。对于封闭或半封闭浅水海域,模型结果之间差异较大。因此,进一步结合更精确的水深数据、岸线数据和多源测高数据对封闭或半封闭浅水海域的潮汐性质进行研究,具有重要的实用价值和科学意义。

### 参 考 文 献

- [1] Mao Wenqing, Shi Ping, Qi Yiquan. Tide Separation from the Altimetry Data Using Harmonic Analysis Method[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(1): 41-45(毛文庆,施平,齐义泉.运用调和分析方法分离卫星高度计资料中的潮汐信息[J].海洋工程,2002,20(1):41-45)
- [2] Wu Ziku, Tian Jiwei, Lv Xianqing, et al. A Numerical Model of Tides in the South China Sea by Adjoint Method [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003,34(1): 101-108(吴自库,田纪伟,吕咸青,等.南海潮汐的伴随同化数值模拟[J].海洋与湖沼,2003,34(1):101-108)
- [3] Tian J W, Zhou L, Zhang X Q, et al. Estimates of  $M_2$  Internal Tide Energy Fluxes Along the Margin of Northwestern Pacific Using TOPEX/POSEIDON Altimeter Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(17): 1 889-1 893
- [4] Fang G H, Kwok Y K, Yu K J, et al. Numerical Simulation of Principal Tidal Constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(7): 845-869
- [5] Yanagi T, Morimoto A, Ichikawa K. Co-tidal and Co-range Charts for the East China Sea and the Yellow Sea Derived from Satellite Altimetric Data [J]. *Journal of Oceanography*, 1997, 53: 303-309
- [6] Yanagi T, Takao T, Morimaot A. Co-tidal and Co-range Charts in the South China Sea Derived from Satellite Altimetry Data[J]. *La Mer*, 1997, 35: 85-93
- [7] Zhao Yunxia, Wei Zexun, Wang Xinyi. The South China Sea Tides Analysis Based on TOPEX/Poseidon Altimetry[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(5): 10-17(赵云霞,魏泽勋,王新怡.利用T/P卫星高度计资料调和分析南海潮汐信息[J].海洋科学,2012,36(5):10-17)
- [8] Bao Jingyang. Study on Thories and Methods of Tidal Analysis Based on Altimetry Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002(暴景阳.基于卫星测高数据的潮汐分析理论与方法研究[D].武汉:武汉大学,2002)
- [9] Bao Jingyang, Chao Dingbo, Li Jiancheng. Tidal Harmonic Analysis near Crossovers of TOPEX/POSEIDON Ground Track in South China Sea[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(1): 17-23(暴景阳,晁定波,李建成.南中国海TOPEX/POSEIDON轨迹交叉点测高数据的潮汐调和分析[J].测绘学报,2000,29(1):17-23)
- [10] Bao Jingyang, Chao Dingbo, Li Jiancheng, et al. A Preliminary Study of the Establishment of Ocean Tide Models in South China Sea from T/P Altimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1999, 24(4): 341-345(暴景阳,晁定波,李建成,等.由T/P卫星测高数据建立南海潮汐模型的初步研究[J].武汉大学学报·信息科学版,1999,24(4):341-345)
- [11] Wang Yihang. The Application in the Study of Satellite Altimeter Data in Ocean Tides[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008(汪一航.卫星高度计资料在海洋潮汐研究中的应用[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2008)
- [12] Wang Yanqiang, Zhang Tianyu, Zhu Xueming. Tidal Characteristics Analysis in the South China Sea by 18.6 Years Satellite Altimetry Data[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 35-40(王延强,仇天宇,朱学明.基于18.6年卫星高度计资料对南海潮汐的分析与研究[J].海洋预报,2014,31(2):35-40)
- [13] Zhong Changwei, Yang Jungang. Extraction of Tidal Information in the East China Sea, the Yellow Sea and the Bohai Sea Based on T/P and Jason-1 Altimeter Data[J]. *Marine Science*, 2013, 37(10): 78-85(仲昌维,杨俊刚.基于T/P和Jason-1高度计数据的渤海东海潮汐信息提取[J].海洋科学,2013,37(10):78-85)
- [14] Xu Jun, Bao Jingyang, Zhang Chuanyin. Establishment of Regional Ocean Tide Model by Combination of TOPEX/Poseidon and Geosat/ERM Altimeter Data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(2): 90-92(许军,暴景阳,章传银.联合TOPXE/Poseidon与Geosat/ERM测高资料建立区域潮汐模型的研究[J].测绘科学,2006,31(2):90-92)
- [15] Li Peiliang, Zuo Juncheng, Li Lei, et al. Orthogonalized Convolution Method for Analysis of South China Sea Tidal Date from TOPEX/POSEIDON [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(3): 287-295(李培良,左军成,李磊,等.南海

TOPEX/POSEIDON 高度计资料的正交响应法潮汐分析[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 287-295)

[16] Bao Jingyang, Xu Jun. Tide Analysis from Altimeter Data and the Establishment and Application of Tide Model[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013(暴景阳, 许军. 卫星测高数据的潮汐提取与建模应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2013)

[17] Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. The Analysis and Prediction of Tide and Tidal Current[M]. Beijing: Ocean Press, 1986(方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986)

[18] Cheng Y C, Andersen O B. Multimission Empirical Ocean Tide Modeling for Shallow Waters and Polar Seas[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2011, 116(C11): 1 130-1 146

[19] Fok H S. Ocean Tides Modeling Using Satellite Altimetry[D]. Columbus: The Ohio State University, 2012

[20] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modeling the Global Ocean Tides: A Modern Insight from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56 (5-6): 394-415

[21] Egbert G D, Bennett A F, Forman M G G. TOPEX/POSEIDON Tides Estimated Using a Global Inverse Model[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 24 821-24 852

## Extraction of Tidal Information in the South China Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 Altimeter Data

FU Yanguang<sup>1</sup> ZHOU Xinghua<sup>1,2</sup> XU Jun<sup>3</sup> LIU Senbo<sup>2</sup> YANG Lei<sup>2</sup>

1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China  
2 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China  
3 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

**Abstract:** Based on the 16 years of data collected from the TOPEX/Poseidon and Jason-1 nominal ground tracks during the primary mission, and six years of TOPEX/Poseidon and Jason-1 interleaved ground track data, we calculate the system error in the South China Sea using the synchronous observation period data. This includes 2 184 primary ground track normal points and 1 626 interleaved ground track normal points with the difference of latitude of 0.1°. Harmonic analysis of the primary normal ground track points, and response analysis of the interleaved ground track normal points, was performed to acquire eight tidal constituents of the harmonic constants, including  $Q_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $K_1$ ,  $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_2$ . Internal accuracy assessment used the discrepancy in the junction points between the ascending and descending orbits. The results show that the interleaved orbit junction points have poor RSS quality of about 7.28 cm. A comparison with the global ocean tide models, shows that the results obtained in our study have a similar performance as the tide models in the South China Sea, except for a big difference RSS quality in the semi-closed shallow-water areas. A comparison with the gauge results shows that the northern part of the South China Sea have poor RSS values due to the influence of the complex tide-wave system. The RMS value of the  $M_2$  constituent in the results reported in this paper and the tide models were 13.64 cm, and the rest of the tidal constituents were within 10 cm.

**Key words:** satellite altimeter; the South China Sea; harmonic analysis; response analysis; harmonic constant

**First author:** FU Yanguang, PhD candidate, specializes in the ocean tide. E-mail: fuyanguang123@163.com

**Corresponding author:** ZHOU Xinghua, PhD, professor. E-mail: xhzhou@fio.org.cn

**Foundation support:** International Science and Technology Cooperation Program of China, No. 2014DFA21710; Marine Surveying and Mapping Program Based on Satellites, No. WX0316005; Ocean Survey Evaluation and Technology Management—Marine Satellite Business Applications and Radio Management; Basic Scientific Research Fund of Non-profit Research Institute of China, No. 2011T05; the National Natural Science Foundation of China, No. 40706038; GNSS Business Project, No. FZ0317001.