

利用 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料 提取黄海、东海潮汐信息的研究*

董晓军 马继瑞[†] 黄 斌 范振华[†] 韩桂军[†] 许崇金[†]

(中国科学院上海天文台 中国科学院国家天文观测中心 上海 200030)

[†](国家海洋信息中心 天津 300171)

摘要 为了更好地利用卫星测高数据分析黄海和东海的潮汐特性,对 1993—1999 年期间的 TOPEX/Poseidon 测高数据进行了质量控制和共线平差处理。在此基础上,在黄海、东海选取了 1738 个测高点,用最小二乘拟合法计算出 12 个分潮的调和常数。计算得出的 M_2 和 m_1 分潮的调和常数,在交叉点评估的内符精度振幅分别为 2.4cm 和 0.8cm,迟角分别为 2.3° 和 2.5°。测高点与附近验潮站的这两个分潮结果相比,振幅的均方根误差小于 4cm,而迟角相差较大。这可能与验潮站的地理环境因素有关。用卫星测高数据算得的调和常数绘制的主要分潮特性图与现有常规观测得到的相应图进行了比较,在外海深水区两者符合较好;近岸由于卫星测高误差较大,所以两者符合差。

关键词 潮汐,卫星高度计,TOPEX/Poseidon,黄海,东海

中图分类号 P731.23

从 20 世纪 70 年代起,海洋卫星测高技术的发展推动了广阔海洋的潮汐研究,特别是 1992 年发射升空的 TOPEX/Poseidon(简称 T/P)卫星测量海面高度的综合精度达到 5cm 左右,明显好于其它的测高卫星(Cheney, 1995),到目前为止它已经进行了 7 年多的成功观测,其数据应用于物理海洋学研究(王海瑛等, 1999; 王东晓等, 2001),包括对全球海潮模型的研究已取得丰硕成果(Cheney, 1995; Shum *et al.*, 1997)。本研究首次利用该卫星,从 1993 年 1 月初开始到 1999 年 6 月底(时间跨度为 6.5 年)在黄海和东海可用的全部测高数据探讨分析潮汐调和常数的有关方法,计算黄海、东海卫星沿轨迹各测高点的主要分潮调和常数,评估在黄海、东海计算出的潮汐调和常数的结果。由于渤海地区的卫星测高资料稀少,故不包括在本文的研究范围内。

1 卫星测高资料的处理

1.1 海面高度的计算

本研究使用的 T/P 卫星测高数据是由法国空间研究中心(CNES)和美国加州工学院喷气推进实验室(PODAAE)提供的综合地球物理数据记录(MGDR)。根据卫星的精密星

* 国家“九五”攀登项目, C95-04-05 号;国家自然科学基金资助项目, 49876001 号。董晓军,男,出生于 1969 年 6 月,博士,助理研究员, E-mail: jrma@263.net

收稿日期: 2000-02-27, 收修改稿日期: 2001-04-10

历和参考面模型(可选择为参考椭球面、大地水准面或平均海平面)可以计算出瞬时海面相对于参考面的高度。本文采用相对于大地水准面的海面高度计算公式为:

$$\xi(t, \lambda, \theta) = h_{\text{sat}} - h_{\text{alt}} + \Delta h - N(\lambda, \theta) \quad (1)$$

式中, λ, θ 分别为 t 时刻卫星在参考椭球体上的星下点的经纬度; h_{sat} 为卫星到参考椭球的距离; h_{alt} 为卫星到海面的测高观测值; Δh 为计算海面高度所需的各项改正(包括仪器改正、海况改正、大气对流层和电离层延迟、固体潮高改正、潮汐负载潮改正、极潮改正和反变气压计效应改正); $N(\lambda, \theta)$ 为大地水准面的高度。

1.2 数据的质量控制和地球物理改正

本研究除了使用 MGDR 提供的数据质量控制标准¹⁾外,还增加了测高海面高度相对于平均海面高模型值偏差的标准。另外,卫星飞行过程中,特别是当从陆地进入海洋上空时,可能会出现高度计失锁,这时,计算得到的相对于平均海平面模型的海面高度会出现很大的异常,有时达到几十米,本文以不超过 3m 的标准控制这种高度计异常现象。一般情况下根据上述这些标准剔除的数据量不到 4%²⁾。

1.3 共线法内插

T/P 卫星采用精确重复轨道,卫星在不同的重复周期(cycle)飞行时,相同 PASS(从赤道起算卫星绕地球飞行半圈)编号的地面轨迹之差一般不超过 1km(图 1)。但不同周期的星下点(如 P_n^k 与 P_m^l 和 P_n^k 与 P_m^l)在沿轨迹方向上相差最大可能达到一个观测间隔的飞行距离(为 6km 左右)。共线法内插就是对于特定的 PASS,将所有周期的观测数据都内插到特定的参考轨迹上,从而减小由于星下点在沿迹方向上的差异引起的海面高度误差。作为内插的第一步,首先需要选择一个标准周期。该周期内的观测数据应该比较多,以避免在内插时损失较多的数据。本文选择的是第 91 个周期。

如图 1 所示,对于特定的 PASS,定义第 M 个周期的第 i 个观测为 P_m^i ,则参考轨迹上的第 N 个周期的第 k 个参考点 P_n^k 在第 M 个周期上的对应的内插点至少有三个:相同纬度点 A、相同经度点 B 和在第 M 个周期相应轨迹上的投影点 C。在图 1 所示的小区域内,可以将球面近似为平面处理。设 A 点的地理经纬度为 $(\lambda + \lambda_0, \theta)$,其中, λ_0 为轨迹升交点的地理经度;B 点的地理经纬度为 $(\lambda + \lambda_0 + \Delta\lambda, \theta + \Delta\theta)$ 。根据球面天文公式,得到 P_n^k 点到 A、B、C 三点的距离分别为:

$$\begin{aligned} \overline{P_n^k A} &= R \cos \theta \cdot \Delta \lambda \\ \overline{P_n^k B} &= R \Delta \theta \\ \overline{P_n^k C} &= \frac{R \cos \theta \cdot \Delta \lambda \cdot \Delta \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta \cdot \Delta \lambda^2 + \Delta \theta^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, R 为地球半径。

以轨迹间距为单位,将点 P_n^k 到 A、B、C 三点的距离系数绘于图 2。从图 2 可以看出,在中、低纬度,以纬度为自变量内插时的 $\overline{P_n^k B}$ (图 2 点划线)与垂直内插时的 $\overline{P_n^k C}$ (图 2 实线)较为接近,相差不超过 10%。当纬度接近轨道倾角时其误差快速增加,直至产生奇

1) AVISO, 1996. AVISO user handbook: Merged TOPEX/Poseidon products. AVI-NT-02-101-CN

2) 董晓军, 1999. TOPEX 卫星精密定轨及测高资料分析研究. 博士论文, 中国科学院上海天文台

点。而以经度为自变量内插时, $\overline{P_n^k A}$ (图 2 虚线) 随纬度的增加而减小, 但与纬度内插相比, 一般情况下距离较大, 但不存在奇点。本文采用了垂直内插方法。

在卫星的测高过程中, 测高值和 TOPEX 双频高度计测得的高电离层改正都存在高频误差, 本文使用 5 点滑动平均的方法以减小高频误差。

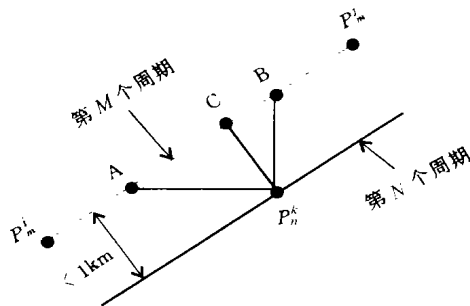


图 1 共线法内插原理图

Fig.1 Interpolation principle of co-linear method
A 为与 P_n^k 相同纬度点, B 为与 P_n^k 相同经度点,
C 为 P_n^k 的投影点

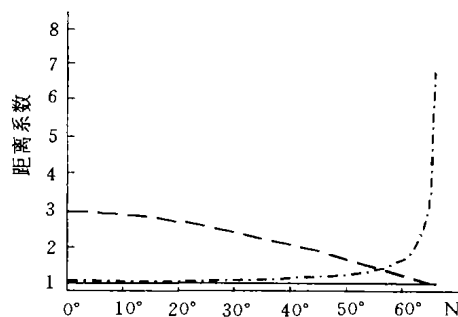


图 2 内插点到参考点的距离系数

Fig.2 The distance factors between interpolation points and reference point
--- $\overline{P_n^k A}$; - · - $\overline{P_n^k B}$; — $\overline{P_n^k C}$

2 潮汐调和分析

通过共线平差处理, 得到了参考点处的海面高度时间序列。对该序列进行调和分析 (方国洪等, 1986) 可计算出参考点处潮汐调和常数。本文考虑了 12 个主要分潮: O_1 、 K_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_2 、 S_2 、 K_2 、 N_2 、 M_4 、 M_6 、 MS_4 和周年分潮 S_a 。由于 K_1 分潮的混淆周期为 173.2 天, 与半年周期相差较小, 根据谱分析原理, 分离这两个谱峰需要 9 年的观测数据, 因此作者在研究中没有分析半年周期的变化, 使用分潮数的多少可能影响调和分析结果。

3 用交叉点评估卫星测高潮汐调和计算的精度

利用交叉点 (卫星测高升降弧段地面轨迹相交处)¹⁾ 处升降弧上调和常数之差可以评估调和常数的精度。在黄海、东海海区内共有 10 个交叉点, 这 10 个交叉点处的调和常数差见表 1。这里用 m_1 分潮 (O_1 分潮和 K_1 分潮的平均值) 作为全日潮的分潮 (赵保仁等, 1994)。对于卫星测高, 可以使用交叉点残差的 $\sqrt{2}/2$ 来表示变量的内符精度。据此, 可以得到 M_2 和 m_1 分潮的振幅精度分别为 2.4cm 和 0.8cm, 迟角精度分别为 2.3° 和 2.5° 。

表 1 交叉点处的调和常数差

Tab.1 The differences of the harmonic constants on crossover points

升弧段 编号	降弧段 编号	交叉点位置		ΔH_{M_2} (cm)	Δg_{M_2} ($^\circ$)	ΔH_{m_1} (cm)	Δg_{m_1} ($^\circ$)
		N	E				
240	51	26°52'	121°53'	-7.3	1.8	0.5	0.7
62	153	34°47'	120°27'	5.4	6.6	-0.5	-5.9

1) Zhang B H, 1986. Geosat/ERM altimeter data analysis for determination of global oceanic mesoscale variability. Doctoral dissertation. The University of Texas

续表

升弧段 编号	降弧段 编号	交叉点位置		ΔH_{M_2} (cm)	Δg_{M_2} (°)	ΔH_{m_1} (cm)	Δg_{m_1} (°)
		N	E				
62	51	29°44'	123°19'	1.4	-2.1	-0.7	0.8
62	127	26°55'	124°44'	-1.8	-2.5	-1.4	-0.2
138	229	34°49'	123°18'	-1.8	-4.0	0.3	-0.8
138	51	32°22'	124°44'	2.0	-4.0	-0.7	0.6
138	127	29°41'	124°44'	1.1	-1.6	-2.1	-1.0
138	203	26°54'	127°33'	0.3	0.0	-1.1	5.1
214	127	32°25'	127°35'	0.9	-2.4	-0.8	1.5
214	203	29°44'	128°59'	-2.6	-0.1	2.3	-7.6
RMS				3.4	3.2	1.2	3.6

4 主要分潮的结果比较

4.1 和验潮站的结果比较

在琉球群岛周围,从历史资料中选择了 13 个海岛验潮站。利用这些验潮站的常规观测结果与 T/P 卫星测得距验潮站最近的点分析得到的调和常数进行比较,其差值列于表 2 中。从该表可见,振幅的差异较小,而迟角相差较大。为此,进一步对那霸(Naha)和宫古(Gonggu)两个站进行了分析。对于那霸站,表 2 中的测高点位于该验潮站的南方,而距该站北方最近的测高点与实测结果相比, M_2 的振幅相差为 -0.8cm ,迟角相差为 0.9 度,南北两测高点距验潮站的距离基本一致,可见,北方较南方点的比较结果有了明显的改进。进一步查看该站的地理位置,该验潮站处于岛屿的北侧且海湾开口向北,其潮波与开阔洋面的潮波传播方向有较大差异,因此造成了上述现象。另一个迟角相差较大的验潮站宫古也有类似的情况。因此,可以认为造成验潮站与测高计算的迟角相差较大的原因可能是验潮站与测高点的位置差异以及验潮站物理背景与周围海域环境的差异;另外的原因是在岛屿附近,测高点数据不连续,数据平滑处理的结果不如开阔洋面的相应结果。

表 2 测高计算的调和常数与验潮站比较结果

Tab.2 The comparison of the harmonic constants calculated from gauges and altimeter data

验潮站名	验潮站位置		测高点位置		两者距离 (km)	ΔH_{M_2} (cm)	Δg_{M_2} (°)	ΔH_{m_1} (cm)	Δg_{m_1} (°)
	N	E	N	E					
绿华山	30°49'	122°36'	30°22'	122°58'	60.6	-7.0	-18.7	0.8	10.7
黄尾屿	25°56'	123°41'	25°44'	124°10'	54.1	3.9	-17.0	-1.4	0.7
与那国岛	24°25'	123°00'	24°11'	123°28'	53.3	4.8	-2.2	-0.3	1.1
宫古	24°48'	125°18'	24°57'	125°38'	37.9	0.0	-23.7	2.1	-20.1
石垣	24°20'	124°10'	24°37'	123°40'	60.6	-1.8	5.5	-2.6	-4.6
仪间	26°20'	126°44'	25°28'	126°53'	97.8	-2.3	-8.6	-0.9	1.9

续表

验潮站名	验潮站位置		测高点位置		两者距离 (km)	ΔH_{M_2} (cm)	Δg_{M_2} (°)	ΔH_{m_1} (cm)	Δg_{m_1} (°)
	N	E	N	E					
甄岛	31°51'	129°51'	31°30'	129°55'	39.4	-4.0	-9.4	-4.6	-0.4
中之岛	29°50'	129°51'	30°05'	129°10'	71.9	0.8	11.5	3.0	4.6
宝岛	29°09'	129°12'	29°25'	129°08'	30.4	4.2	-3.3	1.4	-6.7
笠利湾	28°27'	129°39'	28°45'	129°28'	38.0	-4.8	-4.1	0.4	-4.4
伊平星岛	27°03'	127°58'	27°08'	127°41'	30.1	3.6	5.0	-0.6	-4.9
座间味	26°13'	127°18'	26°54'	127°33'	80.3	-0.4	4.4	0.5	-7.1
那霸	26°13'	127°40'	25°53'	128°02'	52.8	-3.6	-17.1	1.2	-7.1
RMS						3.8	10.9	2.0	7.4

4.2 和现有潮汐分潮特性图比较

图 3 为用 T/P 沿迹测高点数据算得的调和常数绘制的主要分潮等振幅线和等迟角线图,与现有相应的潮汐分潮特性图(海洋水文图集编辑委员会,1992;Fang,1986)比较可见,37°N 以南外海深水区两者符合较好;由卫星测高得出的潮汐特性图在近海也可看出无潮点的大致位置;在沿岸和 37°N 以北的浅水区符合较差。在外海深水区,常规观测点较少,且连续观测时间短,而卫星观测点多,且精度较高;近岸常规观测点较多,且精度较高,而卫星观测点较疏(在此海区轨迹间隔约 200km,沿轨迹点间隔约 6km),且近岸由于潮汐特性复杂,卫星测高误差较大。由此可见,若将两种资料结合起来使用,在外海卫星测高数据将对常规观测是一个很好的补充。

5 结果与讨论

对 T/P 卫星资料进行质量控制和共线平差后,在黄海、东海通过调和与分析得到 1738 个点的 M_2 、 m_1 等主要分潮的调和常数,可以得出以下结论。

5.1 共线平差采用了垂直内插法,较选用以经度或纬度为自变量的内插在理论上更为合理。

5.2 T/P 卫星测高交叉点处调和与分析评估内符精度: M_2 和 m_1 分潮的调和常数振幅分别为 2.4cm 和 0.8cm,迟角分别为 2.3°和 2.5°。

5.3 由 T/P 得到的潮汐调和常数与验潮站比较,振幅符合较好,而迟角相差较大,其原因可能与比较使用的验潮站的地理环境有关。

5.4 T/P 卫星测高在黄海、东海外海确定的潮汐调和常数与验潮站符合较好,利用卫星测高资料可以有效地改进潮汐的研究工作。

5.5 由 T/P 卫星测高得到的主要分潮特性图,在黄海、东海深水区与现有常规观测得到的相应结果符合较好,近岸两者符合较差,若将两种结果结合起来使用,在黄海、东海可以得出较理想的结果。

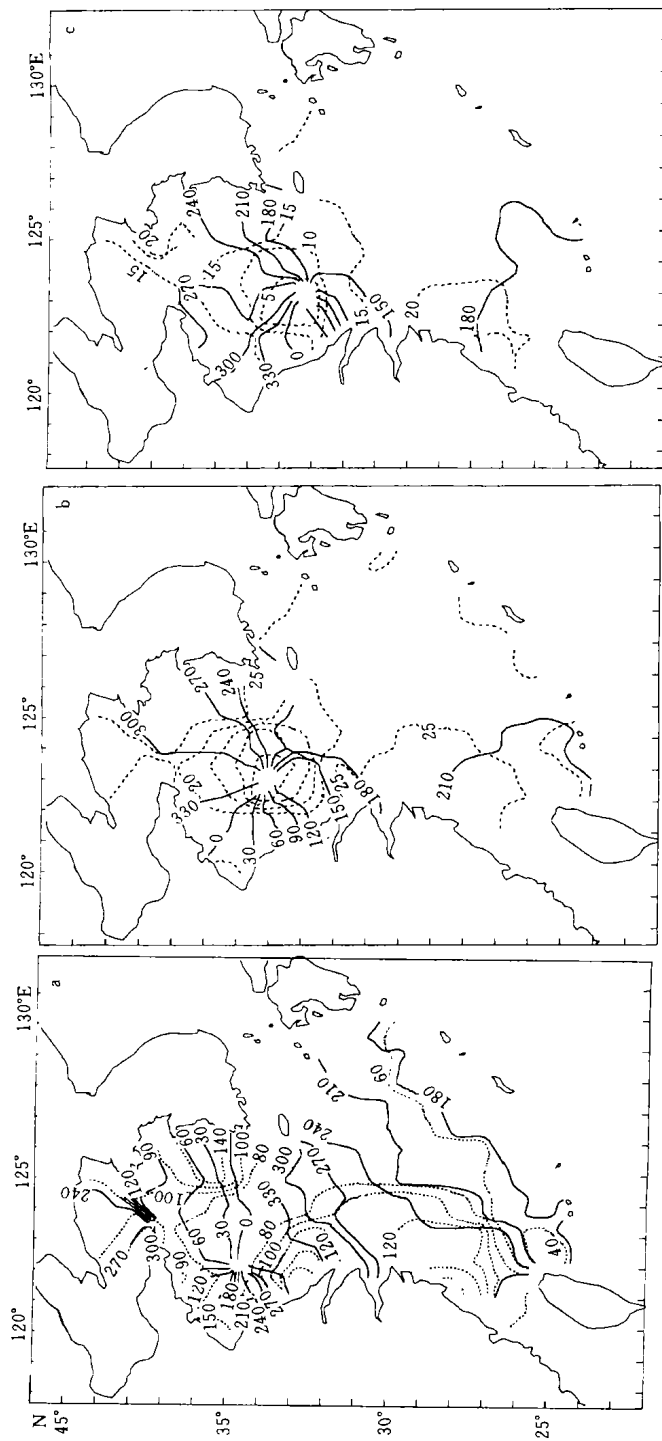


图 3 M_2 (a)分潮、 K_1 (b)分潮、 O_1 (c)分潮振幅(H)和迟角(g)(东 8 时区)分布图

Fig.3 Distribution of (a) M_2 , (b) K_1 , and (c) O_1 tidal amplitude H and phase-lag g (referred to 120°)

--- H (cm); ——— g (°)

参 考 文 献

- 王海瑛,陆洋,许厚洋等,1999. 利用 T/P 卫星测高资料构造中国近海及邻域平均海平面和海面地形. 海洋与湖沼,30(4):403—409
- 王东晓,施平,扬昆等,2001. 南海 TOPEX 海面高度资料的混合同化试验. 海洋与湖沼,32(1):101—109
- 方国洪,郑文振,陈宗镛,1986. 潮汐和潮流的分析和预报. 北京:海洋出版社,58—60
- 赵保仁,方国洪,曹德明,1994. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟. 海洋学报,16(5),1—10
- 海洋水文图集编辑委员会,1992. 渤海、黄海、东海海洋图集(水文). 北京:海洋出版社,429—432
- Cheney R E,1995. TOPEX/Poseidon:Scientific Results. J Geophys Res,100(C12):24893—25382
- Fang Guohong,1986. Tide and tidal current charts for the marginal sea adjacent to China. Chin J Oceanol Limnol,4(1):1—16
- Shum C K,Woodworth P L,Andersen O B *et al*,1997. Accuracy assessment of recent ocean tide models. J Geophys Res,102(C11):25173—25194

TIDAL INFORMATION OF THE YELLOW AND EAST CHINA SEAS FROM TOPEX/POSEIDON SATELLITE ALTIMETRIC DATA

DONG Xiao-Jun, MA Ji-Rui[†], HUANG Cheng, FAN Zhen-Hua[†]
HAN Gui-Jun[†], XU Chong-Jin[†]

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, National Astronomical Observatory Center,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200030)

[†](National Marine Data and Information Service, Tianjin, 300171)

Abstract To analyze the tidal characteristics of the Yellow and East China Seas by using altimetric data, quality control was carried out for all TOPEX/Poseidon Satellite altimetric data from Jan. 1993 to Jun. 1999, and project algorithm was used for the collinear differences. The harmonic constants of 12 tidal constituents were calculated at the 1783 altimetric data points in the study area using the least square fit method. The internal coincidence accuracies of the amplitudes of M_2 and $m_1 (= (K_1 + O_1)/2)$ at the crossover points are 2.4 cm and 0.8 cm, and the accuracies of lags are 2.3° and 2.5° respectively. Compared with tidal stations nearby the altimetric data points the differences of amplitudes of M_2 and m_1 are less than a 4 cm root-mean-square error, but the differences in lags are both big due to the effects of the geographical environment and topography around the stations. The cotidal charts of the major constituents from the satellite altimetric data conform well to those obtained from the routine tidal observations in the deep water and open oceans, but they do not conform as well as those along the coastal areas. If the TOPEX/Poseidon Satellite altimetric data are used for the open and deep oceans where there is no tidal station, and the routine observations are used for the coastal areas, the worldwide harmonic constants obtained from the combined sources will be better than those that only use either of the both data sources. Anyway, the results of tidal analysis of the worldwide should be improved effectively in this way.

Key words Tide, Satellite altimeter, TOPEX/Poseidon, Yellow Sea, East China Sea