

# 高度计资料提取内潮信号的方法

王 斌<sup>1,3</sup>, 张晓爽<sup>2</sup>, 吕咸青<sup>3</sup>, 刘 宁<sup>1</sup>

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**为探索高度计资料提取内潮海表面信号更简便有效的方法,利用 1992—2002 年共 10 a 的 TOPEX/Poseidon(T/P)卫星高度计数据进行处理分析。首先,将 10 a 高度计资料的调和与分析结果与历史数据进行比较,验证调和与分析方法的可靠性。在此基础上,采用 2 种不同的多项式拟合方法提取夏威夷海区  $M_2$  内潮的海表面信号:一种是对振幅  $A$ 、迟角  $G$  分别进行沿轨多项式拟合,另一种是对  $\text{Acos } G$ 、 $\text{Asin } G$  分别进行沿轨多项式拟合。2 种方法的结果对比表明,后者的拟合结果优于前者,且 11 次多项式拟合的结果最优。

**关键词:** 高度计;内潮;提取方法

中图分类号:P731.2

DOI:10.7666/j.issn.1009-3443.20140915015

## Method research about extraction of internal tide using altimeter data

WANG Bin<sup>1,3</sup>, ZHANG Xiaoshuang<sup>2</sup>, LYU Xianqing<sup>3</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** 10-year ocean topography experiment (TOPEX/Poseidon) (T/P) along-track altimetry was used to conduct a method research on the extraction of internal tide. Firstly, the harmonic analysis result about altimeter data was compared with historical data to check whether the harmonic analysis method used in this paper is reliable. Then the method of polynomial fitting was used to extract the  $M_2$  internal tide sea surface signals. In this procedure, two strategies were used to fit the along-track harmonic constants: one to fit the values  $A$  (amplitude) and  $G$  (phase-lag) separately, and the other to fit the values  $\text{Acos } G$  and  $\text{Asin } G$  separately. The comparison of the results obtained from these two different strategies shows that the latter is better than the former, because it can better separate the barotropic and baroclinic components. With the latter strategy the comparison among the results of 3~15th order polynomial fitting was given. The results show that the 11th order polynomial fitting is the best, which can completely separate the barotropic and baroclinic components.

**Key words:** altimetry data; internal tide; extraction method

具有潮频率的内波称为内潮,它是大洋普遍存在的一种运动形式,是大洋混合的主要能源之一,在海洋动力学研究中占有重要地位。在海洋的稳定层,潮流流经中脊、海山、陆架坡时对等密面产生扰动,产生压强梯度力,进而形成同频率的斜压潮<sup>[1]</sup>。天文潮、变化的地形、密度稳定层化的

海水是内潮生成的 3 要素。天文潮作为能源提供能量,变化的地形作为激发源对海水的潮周期运动进行扰动,密度作为载体稳定层化的海水<sup>[2]</sup>。内潮调制引起的海表面振幅与内潮振幅的比值为  $10^{-3}$ <sup>[3]</sup>,即使在一些大的海脊附近,内潮对海表面的调制也仅仅为 3~5 cm。而在其他一些内潮不

收稿日期:2014-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41206031)

作者简介:王 斌,博士,助理研究员,主要研究大洋环流、深海环流、数据同化,notc\_bwang@163.com

活跃的区域,其对海表面的调制一般在 1 cm 以内<sup>[1]</sup>。1992 年升空的 TOPEX/Poseidon 卫星及 2002 年发射的 JASON-1 卫星对海面的观测精度达厘米量级,可以精确测量海表面的起伏特征,从而有助于精确提取内潮海表面信号,对内潮能通量、能量等的研究具有重要意义。R. D. Ray 等<sup>[1]</sup>认为同频率的内潮比正压潮的波长小得多,很少有超过 400 km 的,采用高通滤波的方法对夏威夷海区 3.5 a 的 T/P 卫星高度计数据沿轨进行滤波,滤掉波长大于 400 km 的正压潮部分,得到此海区  $M_2$  内潮分布特征。L. H. Kantha 等<sup>[4]</sup>认为已知各分潮的频率可以求得相应频率内潮的波长,并利用这些频率和波长的假定对 1993 年 1 月至 1997 年 5 月(第 8 至 168 周期)全球范围内的 T/P 卫星高度计数据进行沿轨带通滤波提取内潮海表面信号,获得全球海域内潮海表面信号分布特征。P. F. Cummins 等<sup>[5]</sup>采用 8 次多项式拟合北太平洋海区 7 a 的 T/P 卫星高度计数据滤波提取内潮信号。B. D. Dushaw<sup>[6]</sup>对 Asin G、Acos G 采用 300 km 滑动平均的方法在对夏威夷海区进行滤波获得内潮海表面信号。此外,FAN Lili 等<sup>[7]</sup>利用多项式拟合的方法提取了夏威夷海区同潮图。张效谦等利用 10 年 TOPEX/Poseidon 资料提取太平洋海区海表面内潮信号<sup>[11]</sup>,并给出能量分布。

本文基于以下前提和方法:(1)选用 1992—2002 年近 10 a 的 T/P 卫星高度计数据是为了调和分析的可靠性<sup>[11,12]</sup>;(2)选取夏威夷海区( $170^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{W}, 0^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ )进行  $M_2$  内潮提取,是因为该海区内潮运动尤为活跃;(3)采用多项式拟合的方法是基于 2001 年 P. F. Cummins 等<sup>[5]</sup>的工作,采用该方法可以依据绝均差的大小来判断拟合的精确程度。

# 1 调和与分析结果

本文所采用的数据是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 T/P 卫星高度计数据,时间跨度为 1992 年 10 月至 2002 年 7 月(第 2 至 363 周期)。首先整理这 10 a 的 T/P 卫星高度计数据,得到夏威夷海区各轨道观测点的海表面高度异常数据的时间序列,然后对此时间序列进行调和与分析得到各分潮调和常数。由于观测点观测次数过少会降低调和与分析结果的可靠性,本文在调和与分析的过程中只选取观测次数在 300 以上的观测点。

## 1.1 轨道交点处各分潮调和常数的比较

为了验证上述调和与分析结果的准确性,本文对上行和下行轨道交叉点的调和与分析结果进行了比较。如图 1 所示,在夏威夷海区共分布 54 条(27 条上升轨、27 条下降轨)星下轨道和 339 个轨道交点(红五星)。在这 339 个轨道交点处,对其其中 8 个分潮( $M_2, S_2, K_1, O_1$  为半日潮; $N_2, K_2, P_1, Q_1$  为全日潮)的分潮调和常数进行比较,比较结果如表 1 和表 2 所示,限于篇幅在表中只列出一部分点的结果。

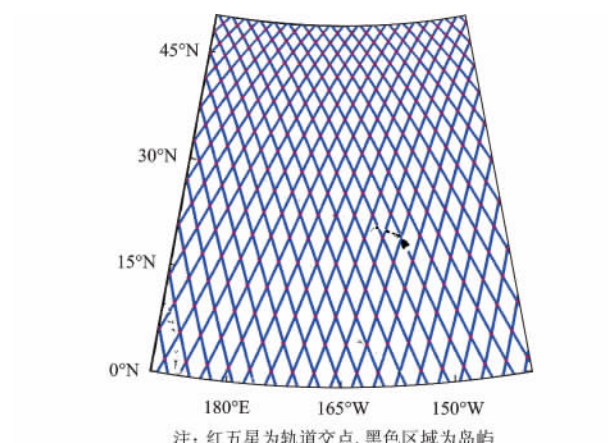


图 1 夏威夷海区星下轨道分布

Fig. 1 The distribution of TOPEX/Poseidon ground tracks near Hawaii

表 1 轨道各交点  $M_2, S_2, K_1, O_1$  分潮振幅与迟角间的比较  
Tab. 1 Differences between harmonics derived from ascending and descending tracks at crossover points

位置		$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
$^{\circ}\text{E}$	$^{\circ}\text{N}$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$
205.53	2.03	-1.13	1.19	1.28	1.95	-1.63	2.70	0.52	0.60
206.93	5.92	-0.32	0.43	-0.69	1.11	0.43	2.45	0.65	1.58
208.35	9.81	-0.81	1.41	-0.48	0.59	-0.15	2.83	1.77	1.79
209.77	13.58	-0.33	1.10	-1.18	1.28	0.21	0.33	1.09	1.42
211.19	17.18	-0.53	0.54	-0.48	0.60	2.16	3.33	0.31	0.41
212.60	20.61	-0.24	0.28	-0.67	0.96	-2.03	2.80	0.24	1.46
214.03	23.87	-1.01	1.05	-0.41	0.50	-2.33	3.03	-0.46	1.21
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
174.34	39.20	0.97	1.63	-0.46	1.50	-1.14	1.24	-0.30	0.54
175.75	41.15	-0.04	0.96	0.78	1.39	1.06	1.12	0.24	0.24
177.19	42.99	-0.72	0.84	0.17	0.17	-0.12	0.15	-0.44	0.45
178.59	44.66	-1.84	1.87	-0.60	0.81	0.50	0.86	0.91	1.24
180.00	46.21	0.62	1.11	0.82	0.87	0.83	0.85	0.00	0.42
181.41	47.65	-0.35	0.88	0.08	0.09	0.54	0.67	-0.23	0.59
182.85	49.02	-1.42	1.42	0.12	1.46	-0.34	0.34	0.19	0.19
均方根		0.76	1.06	0.96	0.99	1.67	2.51	0.83	1.16

表2 轨道各交点处  $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$  分潮振幅与迟角间的比较

Tab. 2 Differences between harmonics derived from ascending and descending tracks at crossover points

位置		$N_2$		$K_2$		$P_1$		$Q_1$	
$^{\circ}\text{E}$	$^{\circ}\text{N}$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$	$\Delta H$	$\Delta$
205.53	2.03	-0.17	0.81	0.16	0.81	0.42	0.51	0.04	0.95
206.93	5.92	0.01	0.01	-0.76	0.94	0.89	2.31	1.54	1.94
208.35	9.81	-0.55	0.87	-0.40	0.55	1.09	1.31	0.10	1.26
209.77	13.58	0.19	0.77	0.25	0.25	-0.67	0.78	0.51	0.62
211.19	17.18	-0.64	0.64	-0.66	1.23	0.55	1.62	0.79	2.34
212.60	20.61	-0.74	1.04	0.37	0.99	-0.96	0.96	-0.29	1.34
214.03	23.87	-1.42	1.45	-0.46	0.78	-0.08	0.08	-0.63	0.77
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
174.34	39.20	-0.75	0.75	-0.24	1.71	2.41	2.54	1.20	1.53
175.75	41.15	-0.01	0.34	0.42	0.44	-0.58	0.61	-1.61	1.64
177.19	42.99	0.09	1.10	-0.37	0.73	0.17	0.36	-1.36	2.46
178.59	44.66	-0.28	2.02	-1.23	1.27	-0.21	0.67	-1.69	2.46
180.00	46.21	-0.49	0.80	-0.34	0.37	0.64	1.20	-0.50	0.51
181.41	47.65	0.30	0.30	0.41	0.71	0.58	0.66	-1.51	1.51
182.85	49.02	0.51	0.65	0.16	0.25	-0.12	1.66	0.64	1.05
均方根		0.69	1.03	1.76	1.20	1.05	1.65	0.91	1.44

表1表2中,  $\Delta H$  表示交点处的振幅差,  $\Delta$  为上升轨与下降轨在交点处调和常数的矢量差异<sup>[8]</sup>,  $\Delta$  定义为:

$$\Delta = [(H_a \cos g_a - H_d \cos g_d)^2 + (H_a \sin g_a - H_d \sin g_d)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

下标  $a, d$  分别代表上、下行轨道。

由表1和表2可知, 振幅差  $\Delta H$  均方差的平均值为 1.08 cm, 最大值和最小值分别为  $K_2$  分潮的 1.76 cm、 $N_2$  分潮的 0.69 cm; 矢量差  $\Delta$  均方差的平均值为 1.38 cm, 最大值和最小值分别为  $K_2$  分潮的 2.51 cm、 $S_2$  分潮的 0.99 cm。上述结果表明, 上、下行轨道在轨道交点处的调和结果偏差很小, 说明调和结果具有很高的可靠性。

## 1.2 与模式结果的比较

将上述  $M_2$  分潮调和常数与俄勒冈大学潮汐模式结果进行比较, 由于此模式模拟全球潮汐的精度是  $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$ , 本文只选取 T/P 卫星观测点与模式网格点距离小于 1 km 的点 (共计 161 个) 作比较, 比较结果如表3所示 (限于篇幅, 表中只列出一部分点的比较结果)。表中  $\Delta H, \Delta G$  分别为观测点与网格点处的振幅绝对均差和迟角绝对均差。

由表3可知, 本文调和结果与模式结果的偏差不大, 振幅差的均方根为 2.27 cm, 迟角差的均方根为  $3.62^{\circ}$ , 说明本文的结果很可靠, 为下一步

提取  $M_2$  内潮海表面信号奠定了基础。

表3 T/P  $M_2$  分潮调和常数与俄勒冈大学潮汐模式模拟  $M_2$  分潮调和常数的比较

Tab. 3 Comparison of  $M_2$  harmonics between derived from T/P and the tide model of Oregon State university

位置( $^{\circ}\text{E}/^{\circ}\text{N}$ )		距离	振幅(cm)/迟角( $^{\circ}$ )		$\Delta H(\text{cm})/\Delta G(^{\circ})$
卫星观测点	模型网格点	km	调和值	模式模拟值	
219.25/0.75	219.25/0.75	0.25	51.20/39.73	55.59/38.19	4.39/1.54
202.25/0.76	202.25/0.75	0.73	23.26/74.25	25.53/76.82	2.27/2.57
193.74/0.75	193.75/0.75	0.74	29.26/121.97	32.47/121.75	3.21/0.22
208.00/1.00	208.00/1.00	0.02	31.38/50.32	34.33/50.12	2.95/0.20
205.25/1.25	205.25/1.25	0.45	27.52/58.92	30.05/59.03	2.53/0.11
196.75/1.25	196.75/1.25	0.36	25.78/108.98	28.04/109.17	2.26/0.19
:	:	:	:	:	:
215.74/45.00	215.75/45.00	0.72	54.46/268.22	57.54/267.44	3.08/0.79
209.25/45.25	209.25/45.25	0.61	47.20/281.20	51.03/281.27	3.83/0.07
200.74/45.25	200.75/45.25	0.95	37.99/298.70	39.37/298.95	1.38/0.25
188.25/46.49	188.25/46.50	0.59	20.06/337.86	21.52/336.87	1.46/0.99
171.25/46.50	171.25/46.50	0.70	12.14/94.39	12.78/94.19	0.64/0.20
172.25/47.00	172.25/47.00	0.04	12.54/88.29	12.82/88.81	0.28/0.52
205.50/48.99	205.50/49.00	0.87	52.32/292.67	55.52/293.07	3.20/0.40
173.51/49.76	173.50/49.75	0.93	15.58/87.34	16.20/84.17	0.62/3.18
194.99/49.74	195.00/49.75	0.86	36.34/324.02	38.89/322.01	2.55/2.01
均方根					2.27/3.62

## 2 夏威夷海区 $M_2$ 内潮的提取

B. D. Dushaw<sup>[6]</sup> 利用 300 km 滑动平均的方法提取夏威夷海区内潮信号。本文认为利用相同尺度的滑动平均不能准确地提取整个海区的内潮信号, 因为内潮的波长在整个海域会保持变化。多项式拟合方法是用 1 个多项式去拟合 1 组数据, 拟合的结果不会受到内潮波长变化的影响。本文利用多项式拟合方法拟合上述调和结果得出的  $M_2$  分潮调和常数, 拟合结果代表正压潮值。通过滤掉正压潮部分来提取  $M_2$  内潮海表面信号。

### 2.1 多项式拟合方法

通过调和结果, 得到某一条轨道上的任一观测点  $p(x, y)$  ( $x$  和  $y$  分别为点  $p$  的经、纬度) 的振幅值  $A$  和迟角值  $G$ 。首先将  $A, G$  转化为  $A \cos G$  和  $A \sin G$ , 然后分别对  $A \cos G, A \sin G$  沿轨进行  $n$  次多项式拟合 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), 最后通过坐标转换得到  $M_2$  内潮的海表面振幅和迟角。以拟合  $A \cos G$  为例说明。

设拟合多项式为:

$$\hat{f}(y) = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + \dots + a_n y^n. \quad (2)$$

构造代价函数:

$$J(a_n) = \sum_{k=1}^N [(a_0 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \dots + a_n y_k^n) -$$

$$A_k \cos G_k]^2, k = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (3)$$

式中,  $y_k$  代表轨道任一观测点的纬度。对式(3)分别求  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  的偏导, 并使其为 0,

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^N [(a_0 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \dots + a_n y_k^n) - A_k \cos G_k] &= 0; \\ \sum_{k=1}^N y_k [(a_0 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \dots + a_n y_k^n) - A_k \cos G_k] &= 0; \\ \sum_{k=1}^N y_k^2 [(a_0 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \dots + a_n y_k^n) - A_k \cos G_k] &= 0; \\ &\dots \\ \sum_{k=1}^N y_k^n [(a_0 + a_1 y_k + a_2 y_k^2 + \dots + a_n y_k^n) - A_k \cos G_k] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为便于阐述, 引入记号:

$$M_{i,j} = \sum_{k=1}^N y_k^{i+j-2}, b_i = \sum_{k=1}^N y_k^{i-1} A_k \cos G_k.$$

其中,  $i, j = 1, 2, \dots, n+1$ 。

式(4)表示为

$$\begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \dots & M_{1,n+1} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & \dots & M_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n+1,1} & M_{n+1,2} & \dots & M_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{n+1} \end{bmatrix}.$$

通过求解上述线性方程组可得系数  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  的值, 并代入式(2)得到正压潮值  $\hat{f}(y_k)$ , 记  $A_k \cos G_k$  与其拟合值  $\hat{f}(y_k)$  之差为

$$\tilde{f}(y_k) = A_k \cos G_k - \hat{f}(y_k).$$

$\tilde{f}_k$  为内潮贡献。同理, 对  $A \sin G$  进行多形式拟合可得

$$\tilde{g}(y_k) = A_k \sin G_k - \hat{g}(y_k).$$

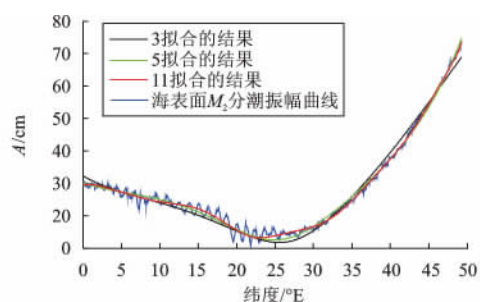
通过坐标转换可求得内潮海表面振幅  $\tilde{A}_k$ 、迟角  $\tilde{G}_k$ 。

## 2.2 多项式拟合结果及分析

利用 § 2.1 所述方法(方法 1)对夏威夷海区调和常数沿轨进行 3~15 次多项式拟合来提取  $M_2$  内潮海表面信号。表 4 和表 5 给出沿不同轨道 3~15 次多项式拟合得出的振幅、迟角的平均绝对均差, 平均绝对均差为沿某一轨道进行  $n$  次多项式拟合得到的分潮振幅/迟角与调和分析得到的分潮振幅/迟角差的

绝对值的均方根。

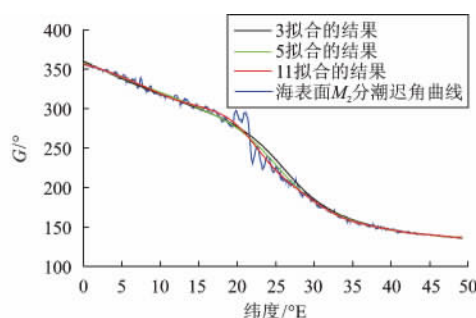
对沿轨数据按照方法 1 进行 3~15 次多项式拟合, 拟合结果的绝对均差的均方根如表 4 和表 5 的最后一行所示。从表 4 表 5 中可以看出拟合次数越高拟合结果的绝对均差不一定越小。从量级上讲, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14 次多项式拟合的振幅绝对均差相当, 明显好于其他次数的拟合结果。同样, 对迟角的高次多项式拟合得到的绝对均差也不一定小, 11 次多项式拟合得到的迟角绝对均差最小, 反而 13 次多项式拟合结果的绝对均差最大。以 223 号轨道为例, 采用方法 1 进行不同次数的多项式拟合, 并选取 3, 5, 11 次多项式拟合的结果进行对比, 以显示不同拟合次数滤波结果的差异, 如图 2 和图 3 所示。



注: 黑色、绿色、红色平滑曲线分别代表 3、5、11 拟合的结果, 蓝色为海表面  $M_2$  分潮振幅曲线

图 2 223 号轨道拟合振幅结果

Fig. 2 Polynomial fitting altitude results of track 223



注: 黑色、绿色、红色平滑曲线分别代表 3、5、11 拟合的结果, 蓝色为海表面  $M_2$  分潮迟角曲线

图 3 223 号轨道拟合迟角结果

Fig. 3 Polyhominal fitting phase-lag results of track 223

由表 4 可知, 沿 223 号轨道分别进行 3, 5, 11 次多项式拟合得到的振幅平均绝对均差分别为 1.47, 0.98, 0.78 cm, 11 次多项式拟合绝对均差最小。由图 2 可以看出, 虽然 3, 5, 11 次多项式的拟合结果都反映海表面  $M_2$  分潮振幅的变化趋势, 但不同次数多项式的拟合结果与海表面  $M_2$  分潮振幅的符合程度存在明显差异。

表 4 由方法 1 得到的沿不同轨道 3~15 次多项式拟合  $M_2$  分潮振幅的绝对均差

Tab. 4 Comparison of amplitude obtained by strategy one

cm

轨道	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
004	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
006	0.85	0.88	0.85	0.78	0.77	0.72	0.71	0.64	0.65	0.63	0.63	0.64	0.74
008	0.70	0.61	0.61	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	0.55	0.55	0.55
019	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.40	0.39	0.40
021	1.41	0.98	0.70	0.70	0.70	0.69	0.70	0.70	0.69	0.68	0.79	0.68	0.68
023	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
030	0.40	0.40	0.40	0.39	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36
032	1.03	0.95	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.75	0.75	0.76
034	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
045	1.15	0.85	0.76	0.73	0.75	0.75	0.74	0.72	0.69	0.63	1.02	0.65	0.64
047	1.14	0.78	0.73	0.74	0.71	0.68	0.66	0.63	0.63	0.65	0.63	0.62	4.62
056	0.50	0.46	0.44	0.44	0.41	0.40	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.39
058	0.66	0.63	0.58	0.58	0.56	0.56	0.53	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53	0.52
069	0.27	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
071	1.52	0.90	0.83	0.79	0.77	0.76	0.74	0.74	0.72	0.76	0.69	0.69	0.73
073	0.46	0.45	0.43	0.42	0.45	0.42	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41
080	0.32	0.32	0.27	9.23	0.31	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26
082	0.85	0.86	0.70	0.58	0.62	0.58	0.59	0.60	0.61	0.59	0.59	0.59	0.59
084	0.69	0.65	0.64	0.60	0.60	0.58	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.54	0.54
095	0.48	0.44	0.41	0.40	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.34
097	1.49	1.03	0.78	0.78	0.72	0.71	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.90
099	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.62	0.35	0.35	0.35	0.35
106	0.45	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.45	0.42	0.42	0.42
108	0.94	0.94	0.91	0.84	0.86	0.83	0.79	0.79	0.77	0.76	2.86	0.76	0.76
110	0.53	0.47	0.47	0.47	0.47	0.45	0.45	0.45	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43
121	0.69	0.62	0.60	0.56	0.56	0.54	0.50	0.49	0.48	0.48	0.52	0.51	0.49
123	1.14	0.84	0.70	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.68
132	0.42	0.42	0.40	0.39	0.39	0.38	0.36	0.36	0.37	0.35	0.36	0.36	0.35
134	0.83	0.78	0.66	0.63	0.63	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
145	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20
147	1.49	0.93	0.83	0.69	0.66	0.62	0.60	0.59	0.59	0.59	0.58	0.56	0.56
149	0.67	0.59	0.55	0.53	0.48	0.47	0.45	0.46	0.45	0.46	0.45	0.44	0.45
156	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27
158	0.62	0.66	0.64	0.58	0.54	0.54	0.48	0.46	0.45	0.45	0.46	0.45	0.47
160	0.75	0.76	0.65	0.65	0.64	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.65	0.62	0.62
171	0.41	0.37	0.33	0.30	0.30	0.30	0.28	0.28	0.28	0.27	2.29	0.25	0.25
173	1.44	1.11	0.80	0.79	0.74	0.74	0.71	0.71	0.74	0.69	0.69	0.70	0.70
175	0.35	0.34	0.35	0.35	0.46	0.62	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33
182	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.39	0.36	0.35	0.82	0.35	0.33
184	0.89	0.99	0.90	0.86	0.80	0.76	0.77	0.71	0.72	0.76	1.12	0.68	0.69
186	0.53	0.53	0.53	0.50	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.48	0.47	0.47	0.47
197	0.54	0.48	0.48	0.44	0.44	0.43	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
199	1.40	0.87	0.67	0.66	0.65	0.65	0.64	0.64	0.60	0.61	0.58	0.57	0.58
201	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.21	2.94	0.21	0.24
208	0.41	0.38	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.35	0.36
210	0.96	0.93	0.71	0.70	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
223	1.47	1.03	0.98	0.90	0.89	0.81	0.82	0.77	0.78	0.89	0.76	0.78	0.78
225	0.80	0.76	0.70	0.62	0.59	0.59	0.58	0.58	0.60	0.56	0.56	0.56	0.56
232	0.24	0.24	0.24	0.23	0.21	0.24	0.25	0.20	0.22	0.20	0.20	0.20	0.20
234	0.66	0.54	0.49	0.47	0.46	0.45	0.45	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.46
236	0.67	0.69	0.63	0.64	0.61	0.60	0.59	0.59	0.60	0.60	0.60	0.85	0.57
247	0.34	0.35	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.40	0.28	0.28
249	1.68	1.24	0.96	0.91	0.83	0.82	0.79	0.78	0.80	0.79	0.80	0.76	0.77
251	0.51	0.50	0.52	0.48	0.48	0.48	0.65	0.48	0.48	0.49	0.49	0.50	0.48
均方根	0.72	0.61	0.55	0.70	0.52	0.51	0.50	0.49	0.49	0.49	0.64	0.49	0.56

表 5 由方法 1 得到的沿不同轨道 3~15 次多项式拟合  $M_2$  分潮迟角的绝对均差

轨道	次数													
道	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
004	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	
006	4.27	3.80	3.45	3.31	3.04	2.83	2.75	2.51	2.42	2.36	2.43	2.25	3.03	
008	8.49	8.48	8.48	7.79	7.79	7.79	7.78	7.78	8.47	8.47	7.78	7.78	8.47	
019	1.21	1.19	1.16	1.15	1.14	1.13	1.13	1.13	1.14	1.14	1.13	1.13	1.29	
021	7.00	6.04	5.75	5.36	5.65	4.90	4.46	4.47	4.39	4.00	5.69	4.01	3.99	
023	1.55	1.49	1.50	1.48	1.48	1.42	1.42	1.40	1.40	1.41	1.41	1.40	1.41	
030	1.47	1.34	1.34	1.37	1.38	1.38	1.37	1.36	1.37	1.31	1.33	1.32	1.31	
032	5.95	5.71	4.83	4.97	4.30	4.37	3.96	4.02	3.90	3.92	3.94	3.93	3.94	
034	0.44	0.45	0.44	0.44	0.43	0.39	0.39	0.39	0.39	0.36	0.35	0.34	0.34	
045	3.74	3.14	2.79	2.65	2.47	2.31	2.29	2.07	2.07	1.99	2.07	1.95	1.95	
047	3.60	3.53	3.44	4.23	4.99	5.71	5.27	4.79	4.79	4.01	5.21	5.20	14.11	
056	1.18	1.14	1.09	1.09	1.02	1.00	0.95	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94	0.94	
058	5.31	3.23	7.32	5.61	3.92	3.93	4.35	4.34	4.29	4.31	3.86	3.86	3.86	
069	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	
071	6.05	5.76	5.89	5.43	4.96	4.55	4.05	4.35	4.65	4.71	4.60	4.56	4.62	
073	2.62	2.39	2.39	2.40	2.63	2.38	2.37	2.33	2.35	2.22	2.22	2.22	2.21	
080	0.28	0.28	0.28	3.29	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.27	0.27	0.27	
082	2.58	2.53	2.66	2.52	2.41	2.24	2.19	2.09	2.01	1.96	2.16	1.97	1.97	
084	7.69	5.36	4.71	4.69	4.10	4.11	4.09	4.66	3.45	3.45	4.06	3.47	3.48	
095	1.25	1.23	1.23	1.16	1.09	1.04	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.04	
097	7.49	7.41	4.73	5.45	5.33	4.94	4.50	4.88	4.48	4.47	4.85	4.47	4.76	
099	1.67	1.64	1.48	1.38	1.38	1.38	1.40	1.37	1.81	1.37	1.37	1.37	1.44	
106	0.72	0.71	0.72	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.69	
108	6.11	5.72	5.38	5.29	5.15	4.78	4.61	4.34	4.25	4.31	16.43	4.09	4.10	
110	10.19	7.49	7.48	7.48	7.49	7.48	7.47	7.44	7.44	7.44	8.79	8.80	7.44	
121	2.25	2.16	1.92	1.89	1.75	1.46	1.46	1.35	1.33	1.32	1.32	1.35	1.32	
123	8.08	7.08	6.53	6.17	6.17	6.53	4.24	4.58	4.18	4.19	4.17	4.13	4.24	
132	0.94	0.93	0.95	0.88	0.88	0.88	0.89	0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.86	
134	2.97	2.92	2.65	2.62	2.60	2.52	2.51	2.48	2.44	2.45	2.45	2.45	2.45	
145	0.24	0.23	0.23	0.24	0.21	0.21	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	
147	5.85	6.03	4.20	2.96	2.84	3.17	2.68	2.29	3.00	2.64	2.63	2.57	2.58	
149	3.41	3.02	2.91	2.77	2.80	2.73	2.73	2.72	2.62	2.77	2.60	2.57	2.61	
156	0.22	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.15	0.16	0.15	0.18	0.15	0.15	
158	2.07	1.96	1.88	1.67	1.56	1.43	1.46	1.37	1.37	1.37	1.36	1.37	1.44	
160	9.24	8.21	7.22	7.71	8.23	9.17	6.02	6.03	6.02	6.50	8.02	6.49	6.49	
171	0.69	0.65	0.64	0.63	0.62	0.58	0.55	0.55	0.55	0.55	1.00	0.55	0.56	
173	8.21	7.90	5.12	4.68	4.89	4.87	5.49	5.49	4.62	5.43	5.42	5.01	4.98	
175	2.86	2.79	2.76	2.77	3.41	4.72	2.76	2.75	2.78	2.83	2.73	2.72	2.73	
182	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	0.47	0.47	0.46	0.51	0.47	0.47	
184	4.86	4.52	4.11	3.90	3.63	3.33	3.11	2.93	2.78	3.10	5.10	2.67	2.69	
186	10.53	9.56	7.73	7.73	8.62	7.72	8.60	6.80	6.79	7.69	6.79	7.69	6.79	
197	1.57	1.34	1.30	1.28	1.26	1.26	1.21	1.20	1.17	1.17	1.17	1.16	1.17	
199	7.92	7.41	5.94	5.95	5.95	5.58	5.96	6.33	6.36	6.35	6.31	6.32	6.32	
201	1.17	1.17	1.17	1.17	1.19	1.18	1.15	1.17	1.14	1.16	98.24	1.15	1.65	
208	1.25	1.20	1.16	1.09	1.09	1.08	1.09	1.08	1.06	1.07	1.06	1.06	1.05	
210	4.77	4.78	4.46	4.41	4.41	4.24	4.23	4.12	4.01	4.01	3.95	3.96	4.04	
223	3.92	4.83	2.97	2.75	2.70	2.55	2.55	2.50	2.50	2.63	2.49	2.49	2.49	
225	2.60	2.40	2.24	2.19	2.12	2.07	2.11	2.11	2.12	2.03	2.05	2.04	2.04	
232	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	
234	1.35	1.33	1.28	1.15	1.14	1.10	1.11	1.08	1.07	1.08	1.06	1.06	1.15	
236	6.77	8.42	10.26	7.41	7.44	7.39	8.30	8.27	3.66	5.92	6.96	18.14	4.11	
247	0.44	0.42	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.40	0.39	0.38	
249	8.55	7.73	7.62	6.76	5.46	5.40	5.29	5.23	6.24	5.60	5.62	6.17	6.17	
251	3.18	3.26	3.14	2.87	2.87	2.87	3.60	2.87	2.88	2.87	2.87	2.90	2.87	

3 次多项式的拟合结果明显偏离调和分析得到的  $M_2$  分潮振幅值,不能正确地拟合出正压潮值;5 次多项式拟合结果在某些位置同样存在偏离现象,即拟合结果不能准确地表示正压潮值;而 11 次多项式拟合结果与海表面  $M_2$  分潮振幅的符合程度最高,能准确地表示正压潮值,从而保证内潮提取结果的准确性。结合表 4 与图 2 可以看出,多项式拟合结果与海表面  $M_2$  分潮振幅绝均差越小,拟合结果与海表面  $M_2$  分潮振幅的符合程度就越高。表 5 与图 3 也同样表现这种关系。

B. D. Dushaw<sup>[6]</sup> 在夏威夷海区采用 300 km 滑动平均的方法进行滤波来提取内潮海表面信号,并认为对  $Asin G, Acos G$  进行滤波的结果要好于对  $A, G$  进行滤波的结果。为了比较这 2 种方法对多项式拟合结果的影响,本文单独对  $A, G$  沿轨进行多项式拟合(方法 2),拟合结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 方法 2 得到的不同次数多项式拟合  $M_2$  分潮振幅的绝均差

Tab. 6 Comparison of amplitude obtained by strategy two

拟合次数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
平均	1.13	0.78	0.69	0.75	0.55	0.53	0.50	0.49	0.49	0.49	0.60	0.48	0.52

注:此表省略每条轨道上的绝均差,仅给出所有轨道绝均差的平均

表 7 方法 2 得到的不同次数多项式拟合  $M_2$  分潮迟角的绝均差

Tab. 7 Comparison of phase-lag obtained by strategy two

拟合次数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
平均	13.89	11.71	10.43	9.65	8.63	7.77	7.08	6.6	6.41	6.49	7.16	6.05	13.09

注:此表省略每条轨道上的绝均差,仅给出所有轨道绝均差的平均

由表 6 和表 7 可以看到,对于方法 2 同样是 11 次多项式拟合结果最好。比较这 2 种方法 11 次多项式拟合的结果,虽然振幅绝均差同是 0.49 cm,但方法 1 得出的迟角绝均差为  $2.62^\circ$ ,方法 2 的结果为  $6.41^\circ$ ,相差  $3.79^\circ$ ,方法 1 的结果好于方法 2。综合比较表 4~7,可以得出对于多项式拟合,方法 2 与方法 1 得到的振幅绝均差相差不大,大部分在 0.1 cm 以下。对于迟角的拟合结果,2 种方法得出的结果差异较大。比较表 5 和表 7 同次数拟合的平均绝均差,方法 2 得到的结果比方法 1 得到的结果多  $5^\circ$  以上,即方法 1 好于方法 2。由此得出对于沿轨多项式拟合滤波方法,方法 1 得到的滤波结果好于方法 2,这与滑动平均方法得到的结论一致。

针对夏威夷海区,  $Asin G, Acos G$  采用 11 次多项式拟合来提取内潮海表面信号。图 4 和图 5 是基于方法 1 获得的海区内潮分布,图 6 是水深分布。

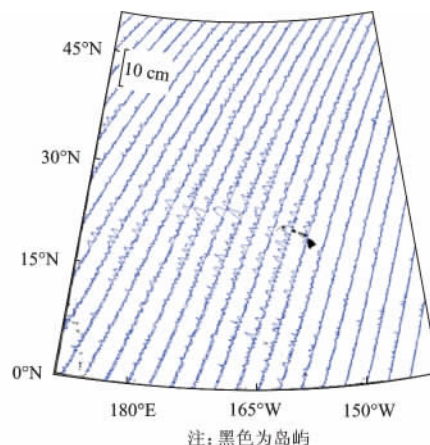


图 4 内潮振幅沿上升轨分布

Fig. 4 The distributions of the sea-surface amplitude of internal tide along the ascending track, the black areas are islands

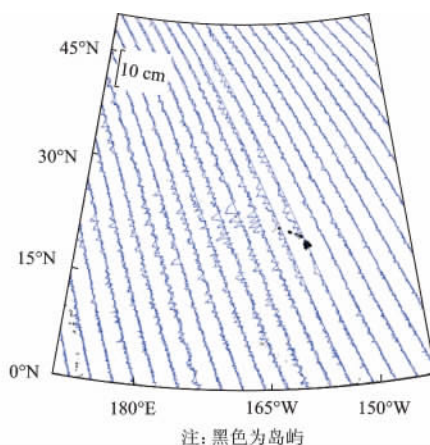


图 5 内潮振幅沿下降轨分布

Fig. 5 The distribution of the sea-surface amplitudes of internal tide along the descending track, the black areas are islands

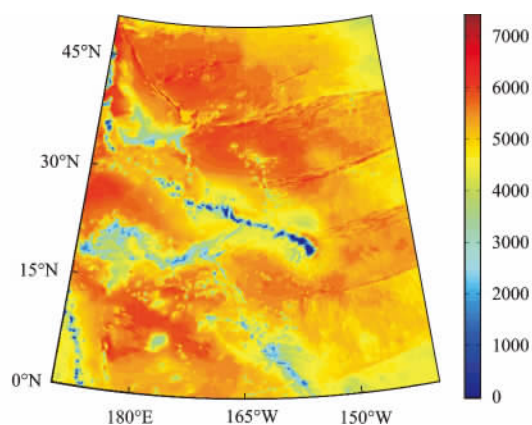


图 6 夏威夷海区水深分布

Fig. 6 The distribution of water depth near Hawaii

如图4,5所示,夏威夷海脊附近 $20\sim 30^{\circ}\text{N}$ , $180\sim 155^{\circ}\text{W}$ ,内潮运动非常活跃,内潮振幅明显大于其他海域,图中反映的内潮分布特征与R. D. Ray等<sup>[1]</sup>得出的内潮分布特征相似。RAY等<sup>[9]</sup>利用8 a的T/P高度计资料得到北太平洋中部 $M_2$ 第一模态能通量,该通量显示 $169\sim 163^{\circ}\text{W}$ 夏威夷中脊产生很强的内潮,即在该区域内潮具有较大的振幅,本文得出的结论与其相近。

### 3 结语

本文选取1992—2002年共10 a的TOPEX/POSEIDON卫星高度计数据进行分析,探讨利用卫星高度计资料提取 $M_2$ 内潮海表面信号更简单可行的方法。首先通过调和分析得到 $M_2$ 分潮信号,然后利用2种不同的多项式拟合方法提取夏威夷海区内 $M_2$ 内潮海表面信号。2种方法的对比及与前人结果的比较表明,本文利用11次多项式拟合方法对沿轨数据 $\text{Asin } G$ 和 $\text{Acos } G$ 进行拟合完全可以得到良好的 $M_2$ 内潮海表面信号结果。结果表明,利用该简便方法提取内潮海表面信号非常有效,极大地简化之前复杂的内潮提取过程。

#### 参考文献:

- [1] RAY R D, MITCHUM G T. Surface manifestation of internal tides in the deep ocean; observations from altimetry and island gauges [J]. *Progress in Oceanography*, 1997, 40: 35-162.
- [2] 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004.
- [3] APEL J R. Principles of ocean physics[M]. London: Academic Press, 1987.
- [4] KANTHA L H, TIERNEY C G. Global baroclinic tides[J]. *Progr Oceanogr*, 1997, 40: 163-178.
- [5] CUMMINS P F, FOREMAN G G. North pacific internal tides from the Aleutian Ridge: Altimeter observations and modeling[J]. *J Marine R*, 2001, 59: 167-191.
- [6] DUSHAW B D. Mapping low-mode internal tides near Hawaii using TOPEX/Poseidon altimeter data [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(8): 1250.
- [7] FAN Lili, WANG Bin, LYU Xianqing. From TOPEX/Poseidon altimetry data to empirical cotidal charts[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 28(4): 606-614.
- [8] FANG Guohong, WANG Yonggang, WEI Zexun, et al. Empirical cotidal of the Bohai, Yellow and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry[J]. *J Geophys R*, 2004, 109: C11006.
- [9] RAY R D, CARTWRIGHT D E. Estimates of internal tide energy from Topex/Poseidon altimetry [J]. *Central North Pacific Geophys Res Lett*, 2001, 28(7): 1259-1262.
- [10] 李立, 吴日升, 李艳初, 等. TOPEX/Posidon 高度计前海潮汐混淆的初步分析[J]. *海洋学报*, 1999, 21(3): 7-14.
- LI Li, WU Risheng, LI Yanchu, et al. A preliminary analysis of shallow water tidal aliasing in TOPEX/Posidon altimetric data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(3): 7-14. (in Chinese).
- [11] 张效谦, 梁鑫峰, 周磊. 利用 TOPEX/Poseidon 高度计资料提取的太平洋 $M_2$ 内潮能通量分布[J]. *海洋学报*, 2005, 25(5): 9-14.
- ZHANG Xiaoqian, LIAN G Xinfeng, ZHOU Lei. Estimates of  $M_2$  internal tide energy fluxes in the Pacific Ocean using TOPEX/Poseidon altimeter data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*. 2005, 25(5): 9-14. (in Chinese).
- [12] 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.
- 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. (in Chinese).

(责任编辑: 孙 威)