

# TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐 混淆的初步分析\*

李立 吴日升 李燕初

甘子钧

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510310)

**摘要** 根据对卫星轨道特征和观测结果的分析, 对 TOPEX/POSEIDON (简称 T/P) 星载高度计在我国近海的潮致混淆现象进行了初步研究. 分析表明, 在浅海区 T/P 高度计的观测结果存在很强的潮致高频混淆. NASA 分发的地球物理记录中所提供的潮汐订正值虽适用于大洋, 但不能有效地除去浅海潮汐. 虽然如此, T/P 潮致混淆的主要频段的周期小于 90 d, 因而可以通过滤波方法提取周期较长的海面高度季节信号, 从而用于季节环流(如南海季风环流)的研究. 采用 FFT/IFFT 方法滤波试验的结果显示, T/P 的海面高度观测结果有很高的精度, 滤波处理后的海面高度距平变化和地面潮位观测结果一致性良好, 上、下行轨道交叉处相邻测点间的标准偏差在 3 cm 左右, 可满足南海环流研究的需要.

**关键词** 卫星高度计 潮汐混淆 TOPEX/POSEIDON 南海 浅海

## 1 引言

卫星高度计直接测量卫星到海面的距离, 经过各种订正后可求得海面高度, 并反演海洋的各种动力学参数, 应用于潮汐、波浪、环流等海洋现象的研究. 潮汐是卫星高度计观测的主要误差来源之一, 因此在有关高度计的算法研究中始终占有重要位置. 反之, 卫星高度计所测量的海面高度值中包含潮汐的贡献, 可从中提取潮汐信号, 用于潮汐研究, 从而进一步改善高度计潮汐订正的精度. 因而, 潮汐订正算法和潮汐本身的研究一直是卫星高度计海洋应用的一个重要领域.

目前可资使用的卫星高度计的地球物理记录资料中通常提供由全球潮汐模型计算的相应的  $1^\circ \times 1^\circ$  潮汐订正值. 对大洋潮汐的空间尺度 ( $>1\ 000\ \text{km}$ ) 而言, 该值订正效果良好. 在浅海区潮汐的尺度通常小于 100 km, 时空差异比大洋大得多, 用该值订正则有很大误差.

本文于 1998-04-01 收到, 修改稿于 1998-07-20 收到.

\* 国家自然科学基金重点资助项目(编号: 49636230), 国家高技术航天领域项目部分资助.

第一作者简介: 李立, 男, 52 岁, 研究员, 现从事物理海洋学研究.

由卫星高度计观测资料提取潮汐信号(或订正)的主要困难来自高度计取样过程引入的高频混淆. 混淆(aliasing)是采样过程所导致的一种误差, 空间采样和时间采样均会产生混淆. 高频混淆指因离散时间采样引起的混淆. 通常我们在对连续时间序列作数值分析时首先进行等间隔离散采样(设采样间隔为  $\Delta t$ ). 当取样间隔过大时将导致原时间序列中频率高于折叠频率 [ $f_c = 1/(2\Delta t)$ ] 的分量向低频方向折叠, 在频谱上形成虚假的谱线(峰), 造成高、低频分量间的混乱. 由采样所导致的这一现象称为高频混淆<sup>[1,2]</sup>.

卫星高度计对海面某处的取样间隔取决于所搭载的卫星轨道的过顶频率. 目前多采用精确重复轨道, 取重复周期为数日或十数日, 其取样间隔远大于主要日潮、半日潮的周期. 因而, 在试图进行潮汐订正或提取潮汐信号前, 对因取样而产生的高频混淆作一分析, 并寻找解决的途径是必要的.

本文以我国近海的 TOPEX/POSEIDON(简称 T/P)观测资料为例, 讨论卫星高度计资料的浅海潮汐高频混淆问题.

## 2 TOPEX/POSEIDON 高度计的取样特征

卫星的轨道组态的确定受许多因素的影响, 而轨道的倾角和周期则决定了卫星如何对海洋采样. 对单星任务而言, 时间和空间分辨率是相互矛盾的: 时间分辨率越高则空间分辨率越低, 反之亦然. 为覆盖整个海洋并有较均衡的时空采样, T/P 选择了轨道倾角为  $66^\circ$  的精确重复轨道. 该轨道的交点周期为 6 745.8 s(约 112 min 绕地球一周). 由于地球呈扁球型, 卫星每绕行一周轨道升交点向东进动  $2.08^\circ$ , 每 127 圈后轨道重复. 因此, 其轨道重复周期为 9.915 6 d, 相邻跨赤道地面轨迹间距为 316 km<sup>[3,4]</sup>.

为从高度计数据中分离并除去潮汐信号以研究海洋环流, 在确定轨道时着重考虑的因素之一是如何避免潮汐造成的高频混淆干扰海洋环流的变化频率, 如零频、周年、半年等. 其次, 还应避免选择造成不同分潮在同一频率上发生混淆的轨道倾角<sup>[3,4]</sup>. T/P 的轨道重复周期远大于潮周期, 其相应的折叠频率为  $0.050\ 426\ \text{d}^{-1}$ , 远低于主要潮汐频率(约  $1\ \text{d}^{-1}$  或更高), 因而其采样必然产生潮致高频混淆. 不仅如此, 浅海(如我国近海)的潮差可达数米, 其能量在水位功率谱上占支配地位, 导致很强的高频混淆. 因此, 正确地分离潮汐信号是卫星高度计资料浅海应用的关键之一<sup>[5]</sup>.

## 3 TOPEX/POSEIDON 海面高度数据的高频混淆

图 1 是 T/P 高度计测得的经校正处理(含潮汐订正)后的海面高度距平(SSA)时序之一例. 该序列所代表的是台湾海峡中以  $25^\circ\text{N}$ 、 $119.96^\circ\text{E}$  为中心一个纬距内, 沿 NW-SE 向下行轨道地面轨迹测点的平均值, 序列长度接近 4 a, 取自 Cheney 等<sup>1)</sup>对 T/P 高度计所做的沿轨迹海平面距平分析. 分析对原始测值已作了各种必要的校正, 包括  $1^\circ \times 1^\circ$  的全球潮汐模型订正. 图中最强的波动特征并非我们所熟知的水位周年变化<sup>[6]</sup>, 而是周期大约在 60 d 左右的很有规律的波动, 其最大波动幅度在 2 m 以上. 如此之强的低频周期性水位波动显然不真实.

1) Cheney B *et al.* TOPEX/POSEIDON altimeter along-track sea level deviation analysis. 1996.

图2给出上述海面高度距平时序的功能谱. 功率谱显示波动能量主要集中在  $0.01 \sim 0.025 \text{ d}^{-1}$  频段(相应周期为  $40 \sim 100 \text{ d}$ ), 主峰位于  $0.016 \text{ d}^{-1}$  (周期  $62 \text{ d}$ ) 附近, 其能量高出其它谱峰一个量级. 表1给出了主要谱峰的物理特征, 其中包括低频段 ( $f > 0.01 \text{ d}^{-1}$ ) 的3个较弱谱峰. 由图2和表1可见, 主峰周期在  $60 \text{ d}$  左右, 次一级谱峰大都在  $90 \text{ d}$  以下的高频段. 下面的分析将说明多数谱峰是因高于折叠频率  $f_c$  的浅海潮汐波动所产生的高频混淆所致.

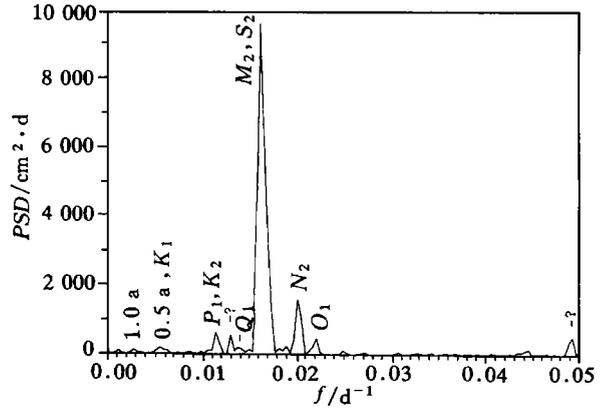
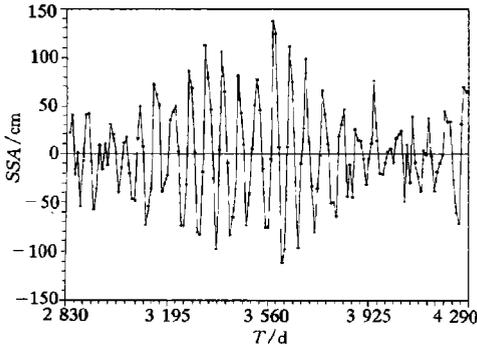


图1 台湾海峡某 T/P 测点的海面高度距平时序  
 取自 Cheney 等<sup>1)</sup>, 测点位置:  $25^{\circ}\text{N}, 119.96^{\circ}\text{E}$ , 横轴代表  
 表相对国际标准时间 1985 年 1 月 1 日 0 时的日数

图2 图1所示时序的功率谱  
 1.0 a 和 0.5 a 分别标明周年和半年波动, 其余标明  
 可能在相应谱峰位置造成混淆的分潮

表1 图1时序的功率谱主要谱峰特征\*

频带序号	频率/ $\text{d}^{-1}$	周期/ $\text{d}$	谱密度/ $\text{cm}^2 \cdot \text{d}$	可能的产生原因
4	0.001 18	846.1	$8.8 \times 10^1$	年度间波动
8	0.002 75	362.6	$1.2 \times 10^2$	周年波动
15	0.005 51	181.3	$1.8 \times 10^2$	半年波动及 $K_1$ 分潮混淆
30	0.011 42	87.5	$6.1 \times 10^2$	$P_1, K_2$ 分潮混淆
34	0.013 00	76.9	$5.4 \times 10^2$	?
42 (41~45)	0.016 15	61.9 (64.3~57.7)	$9.7 \times 10^3$	$M_2, S_2$ 分潮混淆
52	0.020 09	49.8	$1.6 \times 10^3$	$N_2$ 分潮混淆
57	0.022 06	45.3	$4.8 \times 10^2$	$O_1$ 分潮混淆
126	0.049 24	20.3	$5.2 \times 10^2$	?

\* 总频带数: 128, 折叠频率:  $0.050 426 \text{ d}^{-1}$ .

根据有关理论, 高频混淆产生于连续时序的离散采样过程, 原时序在  $f > f_c$  处存在能量, 采样后该能量将被折叠到  $0 \sim f_c$  频段, 并表现在功率谱上. 高频混淆将发生在

$$(2f_c) \pm f, (4f_c) \pm f, \dots, (2nf_c) \pm f, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

处<sup>[1]</sup>, 式中  $f$  为导致混淆的高频波动的频率, 在本文中即为各主要分潮的频率. 所以, 根据已知的各分潮频率可求得各分潮在  $0 \sim f_c$  频段造成混淆的折叠谱峰所在的位置. 表2给出了主要平衡分潮特征, 根据式(1)求得, 它们在  $0 \sim f_c$  频段造成混淆的周期. 比较表1和表2可看

到,在表 2 所列主要分潮的混淆周期相应的位置上均有功率谱峰出现,除  $K_1$  和  $Q_1$  较不明显外,其他谱峰都相当显著,在这些位置上明显受潮致高频混淆的干扰.此外,表 1 半日分潮群混淆功率谱峰的能量排序与表 2 平衡潮振幅排序均依次为  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ ,也从侧面反映了台湾海峡半日分潮群的混淆更为突出.台湾海峡属浅海,其潮汐主要受半日潮支配,日潮较弱,因而日分潮造成的混淆相对较小,其规律性较不明显.

表 2 主要平衡分潮特征及其混淆周期

分潮	频率/d <sup>-1</sup>	振幅相对系数 <sup>[7]</sup> (×10)	混淆周期/d
$Q_1$	0.893 244	730	69.3
$O_1$	0.929 536	3 771	45.7
$P_1$	0.997 262	1 755	88.9
$K_1$	1.002 738	3 623、1 681	173.2
$N_2$	1.895 982	1 759	49.5
$M_2$	1.932 274	9 058	62.1
$S_2$	2.000 000	4 227	58.7
$K_2$	2.005 476	786、365	86.6

以上分析表明,我们所引用的 T/P 高度计资料虽已用大洋模式进行过潮汐订正,但因为模式给出是  $1^\circ \times 1^\circ$  区域潮汐值,在浅海区无法提供准确的订正,所以订正后的海面高度距平中仍含有相当显著的潮致混淆成分.浅海区由于潮汐的空间变化大,需要更为精细、准确的潮汐模式加以订正或用其他算法消除潮致混淆的影响.以上分析还表明,T/P 高度计观测结果的潮致高频混淆主要发生在  $T < 90$  d 频段,因此可采用滤波方法除去频率较高的潮致混淆,保留频率较低的海面高度季节信号,从而用于有关海洋动力过程(如南海季节环流)的研究.

#### 4 TOPEX/POSEIDON 潮致高频混淆滤波试验——与验潮站的比较

基于上述考虑,我们进行了若干滤波试验.试验选择沿岸地面水位站的观测结果与同期的 T/P 高度计观测比较.比较中地面资料采用逐月的月平均值,T/P 资料则采用 FFT/IFFT 法滤波后提取的海面高度.在滤波处理中我们低通滤除了频带序号不小于 29(中心周期等于 90.6 d)的波动,同时带通滤除了第 16 频带因  $K_1$  分潮混淆的影响.

用于比较的沿海水位站是闸波、香港、厦门、平潭,T/P 资料则取自 Cheney 等<sup>[1]</sup>的 TOPEX/POSEIDON 高度计沿轨迹海平面距平分析结果的相近测点.各站位的地理位置及有关特征见表 3.其中 T/P 测点所代表的是以该点为中心一个纬距内,沿卫星地面轨迹的观测平均值.香港、平潭两站距 T/P 对比测点较近,而闸波、厦门则距对比测点较远.

图 3a~d 依次给出闸波、香港、厦门、平潭 1992 年 10 月至 1996 年 10 月的月平均水位距平过程曲线,以及同期相应 T/P 测点的海面高度距平过程曲线(已经 FFT/IFFT 滤波)以供比较.图中横轴所示是相对国际标准时间 1985 年 1 月 1 日 0 时的日数,因而横轴的起始时间 2 830 d 相应于 1992 年 10 月 1 日 0 时.总之,除平潭及其相近的 T/P 测点在 1993 年 3、4 月间(第 3370 天附近)有较大差异外,两种曲线的季节变化趋势呈现相当好的一致性.当然,由于

两测点间有相当距离,统计处理方法也不相同,而且沿海水位站所代表的是岸边的单点测值,而 T/P 测点代表的是一个纬距内延轨迹的平均值,两者间还有一些差别.但图 3 的比较业已表明,采用上述滤波方法可以有效地除去潮致高频混淆,获得海面高度距平的季节信号,从而用于环流研究.

表 3 对比测站的地理位置和有关特征

站名	地面水位站		TOPEX/POSEIDON 测点		地面轨迹走向	相对地面水位站的关系
	北纬	东经	北纬	东经		
闸坡	21.58°	111.82°	21.00°	113.23°	NW-SE(下行)	东南方 92 n mile
香港	22.30°	114.22°	22.00°	114.00°	SW-NE(上行)	西南方 22 n mile
厦门	24.45°	118.07°	23.00°	118.06°	NW-SE(下行)	南方 87 n mile
平潭	25.45°	119.83°	25.00°	119.96°	NW-SE(下行)	东南方 28 n mile

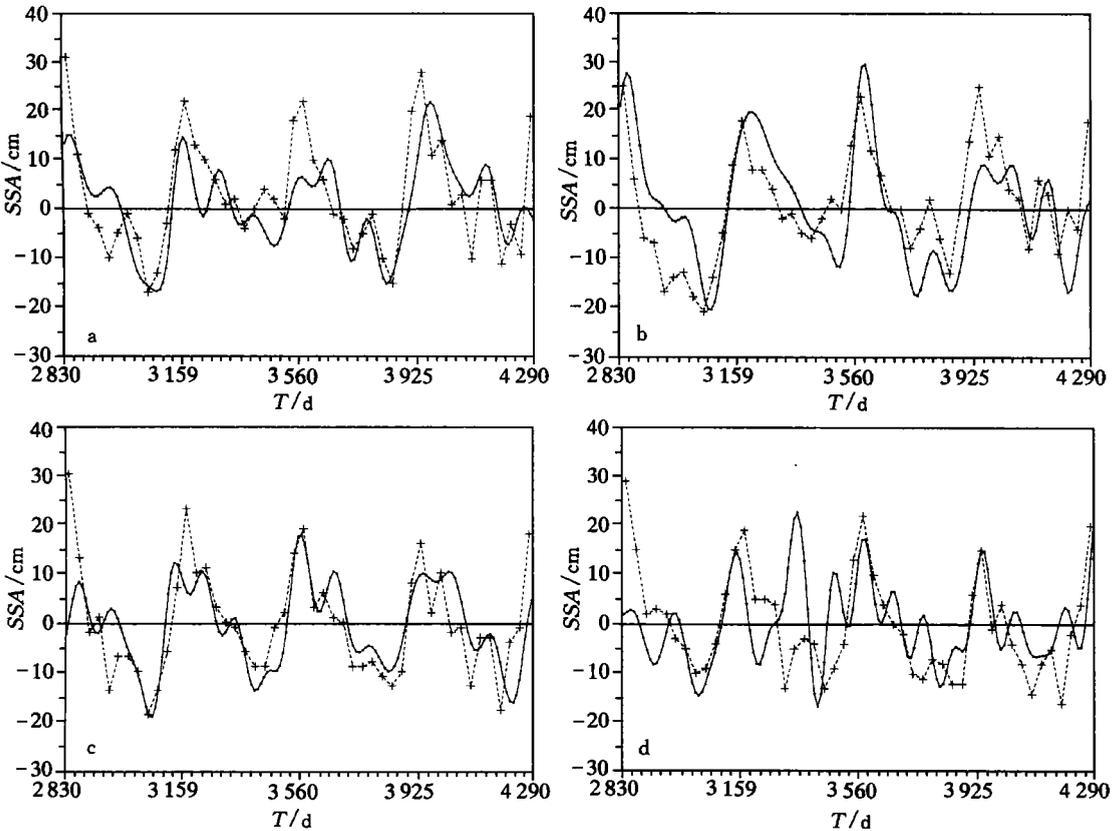


图 3 沿海水位站月平均水位距平变化(虚线)和同期相近 T/P 测点海面高度距平变化(实线)的比较

a. 闸坡 b. 香港 c. 厦门 d. 平潭

比较图 3 内各例不难看出,图 3d 两条曲线的差异明显偏大.这可能与台湾海峡的特殊地理形势有关.一方面介于台湾岛和大陆之间的轨道弧长较短,原始测点样本数不足,可能使误差偏大.另一方面台湾海峡是介于广漠东海和南海间的狭窄水道,悬殊的潮差变化及寒潮大

风或台风引起的剧烈水位波动,造成峡区内数十厘米的水位差异也许是可能的.关于这一点我们以往只有岸边的观测,对离岸情况知之甚少,高度计或许揭示了某种事实亦未可知.

### 5 TOPEX/POSEIDON 潮致高频混淆滤波试验——相邻 T/P 测点间的比较

为进一步验证上述滤波结果的可信性,我们选择南海 T/P 上、下行轨道地面轨迹交点附近测点的海面高度进行相互对比验证.图 4 给出沿 17°N 线两组相邻测点海面高度距平过程曲线的比较,两组测点分别位于海盆东、西两侧,即 109.1°E 和 117.6°E 附近,同一组中两测点间相距不到 6 n mile.两组曲线均吻合得相当好,相互间最大偏差约 5 cm.图 5 清楚地显示,上、下行轨道的观测结果间存在良好的线性关系.对图 5a、b 而言,一阶线性拟合的结果可以分别解释 91% 和 94% 的变化,其余量的标准偏差则分别为 3.34 和 2.97 cm.因而,我们所引用的 T/P 海面高度距平分析质量是很高的,所采用的滤波处理方法也是可行的.

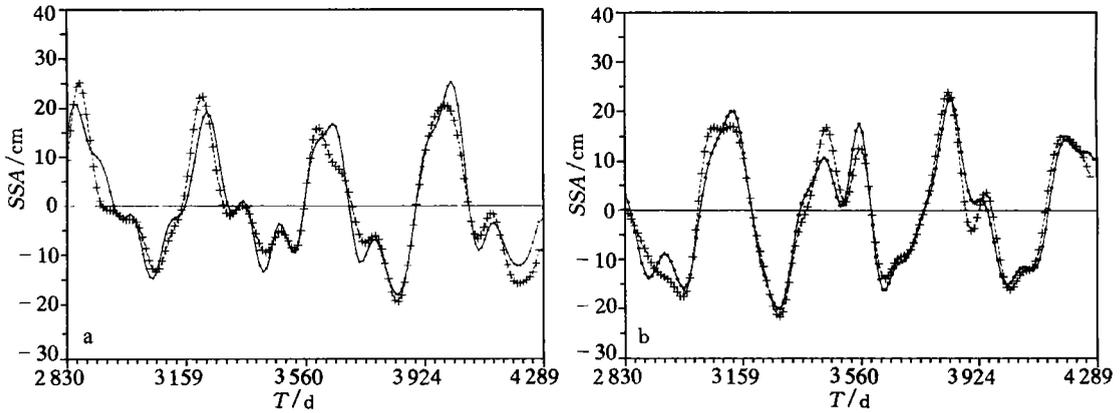


图 4 T/P 上、下行轨道相邻测点海面高度距平过程曲线的比较

a. 17°N、109.11°E(上行,实线)和 17°N、109.19°E(下行,虚线) b. 17°N、117.61°E(上行,实线)和 17°N、117.69°E(下行,虚线)

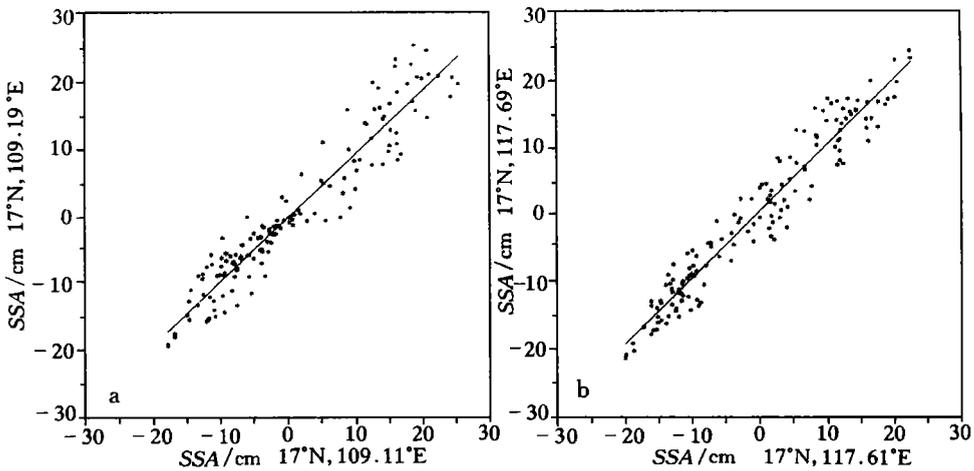


图 5 T/P 上、下行轨道相邻测点海面高度距平间的相关性

## 6 小结与讨论

根据卫星的轨道特征和在我国近海的观测结果,我们对 TOPEX/POSEIDON 高度计在我国近海观测结果的潮致混淆进行了初步研究. 分析表明,在浅海区 T/P 高度计的观测结果存在很强的潮致高频混淆. NASA 地球物理记录中所提供的潮汐订正值(由全球潮汐模型求得)不能有效地除去浅海潮汐. 但 T/P 潮致混淆的主要频段的周期小于 90 d, 因而可以用滤波方法提取海面高度的季节信号,从而用于环流(如南海季节环流)的研究. 采用 FFT/IFFT 方法滤波实验的结果显示, T/P 的海面高度观测结果有很高的精度. 滤波处理后的海面高度距平变化和地面观测结果一致性良好,上、下行轨道相邻测点间的标准偏差在 3 cm 左右.

既然卫星高度计的观测结果包含有潮汐致混淆,那么由此导出的另一问题自然是:能否从高度计的观测结果提取潮汐信息? 事实上国外早在研究潮汐订正方法的同时即开始研究这一问题(如文献[8]). 由于高频混淆,我们难以用常规的潮汐分析技术分离高度计资料中的潮汐分量. 但由于事先知道潮汐的角速率,只要时间序列足够长,我们仍可用调和与分析来求取各潮汐分量的振幅和相角. 因此 Brown 等(1981)尝试用调和与分析法从轨道校正后的 SEASAT 高度计上、下行轨道交点海面高度序列资料中提取了东北太平洋  $M_2$  分潮的调和常数,其结果与海底压力验潮结果相符<sup>[9]</sup>. Cartwright 等人则在响应法的基础上发展了从高度计观测结果提取海洋潮汐的方法,并从 Geosat 高度计的观测资料中求得了全球潮汐分布<sup>[10]</sup>. 此外,科学家们并利用卫星高度计的观测结果改进和发展潮汐模型. 近年来随着卫星高度计进入业务化应用,潮汐研究更有迅速的发展,开发了包括动力学模型建立在高度计观测基础上的经验模型、以及逆模型在内的一系列新的模型(参见文献[3]),而这些研究的进展反过来又可有效地提高了高度计的海洋观测精度.

目前,我国同类工作尚十分薄弱,许多领域几乎是空白,而国外的发展已有约 30 年的历史. 因而,尽快启动有关研究是发展我国卫星高度计及其海洋应用的当务之急.

闸坡、香港、厦门水位资料由 UH Sea Level Center 提供,平潭水位资料由吴培木教授提供,谨致谢意.

## 参考文献

- 1 Bendat J S, Piersol A G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley-Interscience, New York., 1971, 407
- 2 方国洪,郑文振,陈宗镛等.潮汐和潮流的分析和预报.北京:海洋出版社,1986,474
- 3 Fu L-L, Christensen E J, Yamarone C A Jr. TOPEX/POSEIDON mission overview. J. Geophys. Res., 1994, **99**, 24 369~24 382
- 4 Parke M E, Stewart R H, Farless D L. On the choice of orbits for an altimetric satellite to study ocean circulation and tides. J. Geophys. Res., 1987, **92**, 11 693~11 707
- 5 Schlax M G, Chelton D B. Aliased tidal errors in TOPEX/POSEIDON sea surface height data. J. Geophys. Res., 1994, **99**, 24 761~24 775
- 6 李立.台湾海峡两岸月平均海面高度的变化.台湾海峡,1987, **6**(3): 234~239
- 7 Dronkers J J. Tidal Computation in Rivers and Coastal Waters. North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1962, 518
- 8 Zetler B D, Maul G A. Precision requirement for a spacecraft tide program. J. Geophys. Res., 1971, **76**, 6 601~6 605
- 9 Brown R D, Hutchinson M K. Ocean tide determination from satellite altimetry. In: Oceanography from Space, Mar. Sci., Vol. 13 (Gower J F R ed.), Plenum, New York, 1981, 897~906

10 Cartwright D E, Ray R D. Ocean tides from Geosat altimetry. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**, 3 069~3 090

## A preliminary analysis of shallow water tidal aliasing in TOPEX/POSEIDON altimetric data

Li Li,<sup>1</sup> Wu Risheng,<sup>1</sup> Li Yanchu,<sup>1</sup> Gan Zijun<sup>2</sup>

1. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005*

2. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301*

**Abstract**——Aliased tidal errors in TOPEX/POSEIDON (T/P) altimetric data were studied based on analyses of satellite orbit features and observations in China's near seas. The results show that in shallow waters strong tidal aliasing occurs in observations of T/P altimeter. Although the tidal correction provided in NASA's Geophysical Data Records works quite well for deep ocean basins, it can not effectively remove shallow water tides. However, since the main aliased tidal periods of T/P are shorter than 90 d, one can extract the longer seasonal signal of sea surface height through filtering procedure. The filtered results can then be used to study seasonal circulation (e.g., the monsoon driven circulation in the South China Sea). Results of several filtering experiments using a FFT/IFFT filter show that T/P altimeter measurement is quite accurate. The deviations of filtered sea surface height consist very well with ground observation from tide gauges. The standard deviation between sea surface height observed by ascending and descending orbits near a cross-over point is about 3 cm, which will satisfy demands of the South China Sea circulation studies.

**Key words** Satellite altimeter, tidal aliasing, TOPEX/POSEIDON, the South China Sea, shallow water