

以相邻点海面高度差为观测量的沿迹调和和分析新方法的

许 军¹ 暴景阳^{1,2} 刘雁春¹ 曹 勇²

(1 大连舰艇学院海洋与测绘科学系, 大连市解放路 667 号, 116018)

(2 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛市仙霞岭路 6 号, 260061)

摘要:采用 TOPEX/POSEIDON 卫星轨迹上相邻点的海面高差作为观测量,在交叉点分析结果的控制下构成同一弧段上观测量在两相邻交叉点间的综合观测方程,以轨迹上纬差 0.1° 的正常点的潮汐参数构成总体待估参数系列,实施最小二乘综合解算。分析结果表明,这种差分模式可以基本消除非潮汐因素的影响,提高潮汐参数估计的精度和可靠性,可比一般沿迹逐点分析给出更为平滑的沿迹参数分布,更符合海洋潮汐运动的物理背景。

关键词: 卫星测高; TOPEX/POSEIDON; 潮汐调和和分析; 差分模式

中图法分类号: P229.2; P228.3

执行精密重复轨迹任务的测高卫星能够以高分辨率测定其轨迹剖面的海面高及其动态变化,从而可以按调和和分析或响应分析法获得沿迹上的高分辨率潮汐参数。T/P 卫星完全克服了主要分潮之间的混叠影响^[1],可反演出卫星轨迹上可靠的潮汐参数。Tieney^[2]、暴景阳^[3]对 T/P 实测数据的分析计算表明,不论在开阔的大洋海域,还是近岸复杂海域,都可得到较高精度的潮汐参数,这一点通过轨迹交叉点分析结果比较得到了证实。对于轨迹交叉点而言,因为数据采样规律的复杂化有效地克服了分潮间的混叠影响,同时由于观测数据的增加,可以保证交叉点的潮汐分析结果比一般的沿迹分析结果有更高的精度和可靠性^[3,4]。

潮汐分析过程的实质是以实测的海面高序列在一定的准则(通常采用最小二乘准则)下拟合逼近于所给定的潮高模型,并估计模型中所包含的参数。因为非潮汐因素(轨道误差、环境改正误差等)的影响,使得拟合逼近的中误差偏大,其数值主要反映了这些非潮汐影响因素的贡献,它同时也影响着估计参数的精度和可靠性^[1]。

1 T/P 沿迹潮汐分析的基本方程与差分模式

1.1 海面高的表达及分析

卫星轨迹上每一测点的海面高由调和表达式可描述为^[5]:

$$\begin{aligned} h(t) &= \bar{h} + \sum_{i=1}^m f_i H_i \cos[X_i(t) + u_i - g_i] + \Delta \\ &= \bar{h} + \sum_{i=1}^m f_i \cos[X_i(t) + u_i] U_i + \sum_{i=1}^m f_i \cdot \\ &\quad \sin[X_i(t) + u_i] V_i + \Delta \end{aligned} \quad (1)$$

式中, t 为观测时刻; h 为瞬时海面高; \bar{h} 为测点处的平均海面高,可取为相对于参考椭球面或 OS-UMSS95 平均海面模型的海面高; f_i 、 u_i 为分潮交点因子和交点订正角; X_i 为平衡潮展开式对应的分潮相角; m 为模型中包含的分潮个数; H_i 、 g_i 为分潮调和常数,即振幅和迟角; U_i 、 V_i 为分潮的余弦分量和正弦分量; Δ 为观测误差、非潮汐因素影响和模型中未顾及的小分潮潮高贡献的总和,称其为模型残差,当模型中顾及的分潮足以反映潮汐成分时,其主体是非潮汐水位高度。

收稿日期: 2006-09-12。

项目来源: 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目(03-04-06; 1469990324233-04-03); 国家测绘局测绘科技发展基金资助项目(2001-01-02)。

n 周的观测海面高构成观测序列, 在最小二乘准则下可求得该测点的潮汐参数。

1.2 差分海面高序列的潮汐分析

考虑到沿迹相邻点的海面高及潮汐参数的相关性, 本文以相邻点的海面高度差作为观测量, 在交叉点分析结果的控制下构成两相邻交叉点间的综合观测方程, 称为差分模式。

由式(1)可取相邻两点 A 、 B 的海面高观测方程, 并取二者的差分, 得:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{AB}(t_A, t_B) &= \delta \bar{h}_{AB} + \sum_{i=1}^m \{f_i \cos[X_i(t_B) + u_i]\} \\ U_{B_i} - f_i \cos[X_i(t_A) + u_i] U_{A_i} &+ \sum_{i=1}^m \{f_i \sin \\ [X_i(t_B) + u_i] V_{B_i} - f_i \sin[X_i(t_A) + u_i] V_{A_i}\} &+ \delta \Delta_{AB} \end{aligned} \quad (2)$$

因为卫星沿其轨道高速运行, 所以轨迹上相邻观测点海面高具有很小的观测时间差, 由气象、海流等引起的海面高变化可以认为基本是同步的, 从而 $\delta \Delta_{AB}$ 的量值与 Δ_A 、 Δ_B 相比应有大幅度减小。以 Cycle11Pass177 中的 $15^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ 弧段为例, 将由逐点调和的结果反代入式(1)求得 Δ_A 、 Δ_B 的估值, 进而再由式(2)求得 $\delta \Delta_{AB}$, 它们的量值大小比较见图 1。

2 点的海面高的差构成 $N - 1$ 个形如式(4)的观测方程:

$$\mathcal{L}_j = B_j Y + \delta \Delta_j \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_j &= \begin{bmatrix} \mathcal{H}_{12} \\ \mathcal{H}_{23} \\ \vdots \\ \mathcal{H}_{N-1, N} \end{bmatrix}_j, \delta \Delta_j = \begin{bmatrix} \delta \Delta_{12} \\ \delta \Delta_{23} \\ \vdots \\ \delta \Delta_{N-1, N} \end{bmatrix}_j \\ B_j &= \begin{bmatrix} -b_1 & b_2 \\ & b_2 & b_3 \\ & & \ddots \\ & & & b_3 & b_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

在此, 行向量 b 表示每一海面高与潮汐参数的投影关系, 下标对应于该弧段上划分的测高点编号。

对应于第 j 周卫星通过, \mathcal{L}_j 对应的权阵为:

$$P_j = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & & \\ -1 & 2 & -1 & & & \\ & -1 & 2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 2 & -1 \\ & & & & -1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

而不同周的权阵不相关, 所以, 总权阵为:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(4)构成总体观测方程, 并顾及总体权阵, 在最小二乘准则下求解(估计)该弧段上 N 个测点的潮汐调和常数, 就构成差分分析算法的基本思路。

1.3 数据约束

由于差分观测方程式(4)采用的观测量为卫星轨迹上相邻点的海面高差, 它基本对应于相邻点间的潮汐参数差, 而本文的任务是反演绝对的潮汐参数, 为此需要增加适当的数据约束, 以为解算的方程提供稳定的基准条件。

顾及已获得卫星轨迹交叉点处可靠的潮汐参数, 可以将其当作基准条件, 补充于总的观测方程。对一般的卫星测线, 取两个交叉点之间的弧段作为解算弧段, 于是, 可以给定首尾点两个基准条件。最小二乘解的方程如下。

观测方程为:

$$\mathcal{L} = B Y + \delta \Delta, P \quad (8)$$

约束方程为:

$$\begin{aligned} X_1 &= E_1 Y = X_1^0 \\ X_N &= E_N Y = X_N^0 \end{aligned} \quad (9)$$

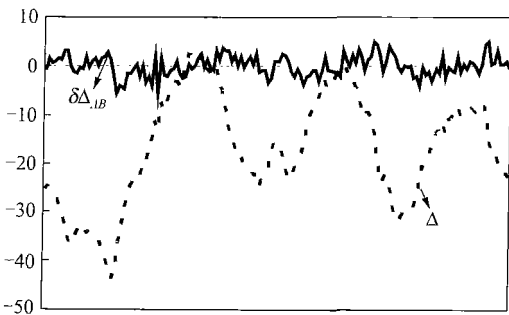


图 1 Δ 与 $\delta \Delta_{AB}$ 的量值比较

Fig. 1 Comparison Between Δ and $\delta \Delta_{AB}$

从图 1 中可见, $\delta \Delta_{AB}$ 相对于 Δ_A 、 Δ_B 量值总体小很多, 只在零上下摆动。对于其他数据也有类似的结论, 即沿迹相邻两点的非潮汐因素的影响基本相等。对于式(2), $\delta \Delta_{AB}$ 是模型残差, 它的量值减小, 将使残差的中误差和参数向量的方差减小, 这说明差分模式将能提高参数的精度和可靠性。

假设将一个轨迹弧段以 N 个采样点分割, 且在这 N 个点上每周都有测高值, 可以将这 N 个点的潮汐参数向量拉直为该弧段上的一综合潮汐参数向量:

$$Y = [X_1^T \quad X_2^T \quad \dots \quad X_N^T]^T \quad (3)$$

对于 N 个测点, 由第 j 周卫星通过的每相邻

若一弧段只有一个交叉点(如弧段的另一侧闭合于岸边),可只采用其中的一个约束条件。将约束条件统一写为:

$$EY = X^0 \quad (10)$$

于是,带约束的最小二乘解算方程为:

$$\begin{bmatrix} B^T P B & E^T \\ E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^T P \delta L \\ X^0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, K 为联系系数。

2 数据处理与结果分析

2.1 数据处理

以上讨论就每次卫星通过形成固定的测高点的假设展开,而事实上,卫星以时间为参量采样,不同周的测高点往往不重合。为此,在具体潮汐反演计算之前,沿迹按一定间隔(在此取纬差 0.1°)形成正常点。正常点的海面高通过每秒一次的海面高经多项式拟合得到,从而形成正常点的海面高观测序列。

为采用交叉点结果作为约束条件,首先获得交叉点的测高数据,通过内插分别得到上升轨迹

和下降轨迹在交叉点处由拟合法得到的交叉点序列,按式(1)求解潮汐参数。

2.2 结果分析

依据上述数据约束下的差分模式,本文对中国近海及西北太平洋海域内($2^\circ\text{N} \sim 5^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$)的 10~330 周 T/P 测高数据进行了潮汐调和与分析计算,得到了 8 474 个正常点处的 12 个主要分潮(长周期分潮,全日分潮,半日分潮各 4 个)的调和常数。

海洋潮汐以动力机制驱动下的长波运动形式而存在,相邻两点的潮汐参数应有很强的相关性,即潮汐参数的沿迹变化应是平滑的。差分模式以相邻两正常点的海面高差作为观测量,考虑了相邻点间的强相关性,所以相对于一般的沿迹逐点分析,差分模式得到的潮汐参数平滑性应得到很大改善。图 2 是差分模式分析与沿迹逐点分析结果比较。图中,以卫星轨迹为参考坐标系的横轴,纵轴垂直于轨迹,对不同的分潮,采用不同的纵坐标尺度。对于主要分潮差分模式,分析结果与逐点分析结果在整体趋势上保持了很强的一致性,但差分模式的分析结果明显平滑,更符合海洋潮汐运动的物理背景。

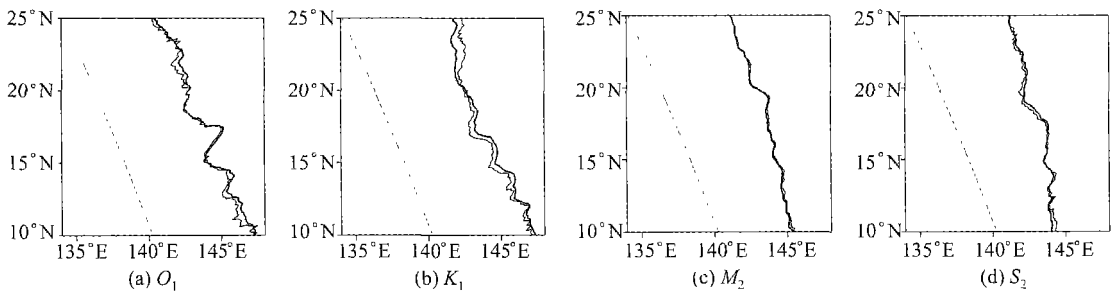


图 2 差分模式分析结果(粗线)与逐点分析结果(细线)比较图

Fig. 2 Comparison Between the Results of Differential Mode (thick) and Analysis Along Track Points (thin)

T/P 数据沿迹逐点分析的平均拟合逼近中误差约为 $11 \text{ cm}^{[1]}$, 主要原因是逐点分析不能消除或减弱非潮汐因素的影响。轨道径向误差是长波长的,而环境改正误差则是中长波长的。两相邻正常点的纬差为 0.1° , 在赤道附近的两点距离最大,约为 11 km 。两相邻点的测高海面高包含的轨道径向误差和环境改正误差应可认为相等,两者的差分抵消了误差的影响。同时卫星沿迹高速运行,观测时间差很小,由气象、海流引起的海面高变化在差分中也基本被消除。所以可以认为差分模式已基本消除了非潮汐因素的影响,模型残差主体为测高仪测高误差。通过实际计算得到的差分模式的平均拟合逼近中误差为 1.3 cm 。

3 结 语

本文采用的差分模式有效地消除了非潮汐因素对潮汐参数估计的影响,模型的拟合中误差从沿迹逐点分析的平均 11 cm 减小到 1.3 cm , 较大幅度提高了潮汐参数的精度和可靠性。同时,差分模式以两相邻交叉点间的正常点的潮汐参数构成总体待估参数系列实施最小二乘综合解算,考虑了相邻点潮汐参数间的强相关性,故参数沿迹分布比沿迹逐点分析更平滑,这更符合海洋潮汐运动的物理背景。西北太平洋存在着北赤道流、北赤道逆流、黑潮及中尺度涡流等,都是有较大尺度的非潮汐因素。本文的差分模型对利用卫星测高数据反

演高精度的潮汐参数有重要的实用意义。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] Tierney C C. An Investigation of Ocean Tides Derived from Along-Track Altimetry[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C5): 10 273-10 287
- [3] Bao Jingyang, Chao Dingbo. Harmonic Tidal Analysis Along T/P Tracks in China Seas and Vicinity [C]. International Association of Geodesy Symposium, Wuhan, 2002
- [4] 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与分析[J]. *测绘学报*, 2000, 29(1): 17-23
- [5] 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
- [6] 暴景阳. 由 T/P 卫星测高数据建立南中国海潮汐模型的初步研究[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, 24(4): 344-345
- [7] 翟国君, 黄谟涛, 谢锡军, 等. 卫星测高数据处理的理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000
- [8] 刘克修, 马继瑞, 韩桂军, 等. 引入差比关系法分析西北太平洋 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计测高数据[J]. *海洋学报*, 2002, 24(4): 2-10
- [9] 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): 267-295
- [10] PO DAAC. Merged GDR (TOPEX/POSEIDON) Generation B User's Handbook. JPL D-11007[R]. Jet Propulsion Laboratory, 1997
- [11] Matsumoto K, Takanezawa M. Ocean Tide Models Developed by Assimilating T/P Altimeter Data into Hydrodynamical Model: a Global Model and a Regional Model Around Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2000(56): 567-581
- [12] Engelis T. Radial Orbit Error Reduction and Sea Surface Topography Determination Using Satellite Altimetry[R]. OSU, 1987
- [13] Schrama E J O. The Role of Orbit Errors in Processing of Satellite Altimeter Data[D]. Delft: Delft University of Technology, 1989
- [14] Cheng Luying, Hsu Houtse. Determination of Sea Level Height Variation by Dynamics Crossover Adjustment[C]. International Association of Geodesy Symposia, Wuhan, 2002
- [15] 李立, 吴日升, 李燕初, 等. TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析[J]. *海洋学报*, 1999, 21(3): 7-14
- [16] 毛庆文, 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

第一作者简介: 许军, 博士生。现主要从事卫星测高数据的处理、应用及海道测量中的水位改正研究。
E-mail: xujun_1999@yahoo.com.cn

Harmonic Tidal Analysis along T/P Tracks Taking Difference of Observed Sea Surface Heights at Adjacent Points as Observations

XU Jun¹ BAO Jingyang^{1,2} LIU Yanchun¹ CAO Yong²

(1 Department of Hydrography and Mapping, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)

(2 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 6 Xianxia Road, Qingdao 266061, China)

Abstract: An algorithm is presented for the improvement of harmonic tidal analysis along T/P tracks, in which the differences between the observed sea surface heights at adjacent points are taken as observations, and the observation equations are constrained with the results of the cross over analysis. It is indicated that the algorithm presented can efficiently remove non-tidal effects in the altimeter observations, and improve the precision of tide parameters. Moreover, parameters along altimetry tracks represent smoother distribution than those obtained from traditional algorithms.

Key words: satellite altimetry; T/P; harmonic tidal analysis; differential mode

About the first author: XU Jun, Ph D candidate, majors in the applications of satellite altimetry and the correction of water level in hydrographic surveying.

E-mail: xujun_1999@yahoo.com.cn