

Bao L F, Lu Y, Xu H Z. Waveform retracking of Topex/Poseidon altimeter in Chinese offshore. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 216~221

浅海区域 Topex/Poseidon 测高卫星数据波形 重构方法

鲍李峰¹ 陆 洋^{1,2} 许厚泽^{1,2}

1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

2 中国科学院天文地球动力学联合研究中心, 上海 200030

摘 要 根据测高卫星返回波形的特征, 给出了由 Topex/Poseidon 卫星波形数据进行波形重构的方法, 并采用函数逼近算法确定波形重构改正量, 进而改善测高卫星近海岸海面高观测值的精度. 在中国南海区域计算了四圈 T/P 测高卫星经过波形重构后的海面高数据. 近海岸海面高数据与相近时刻验潮站数据相比, 精度比波形重构前有了很大提高, 证明该方法的有效性.

关键词 卫星测高 波形重构 波形数据处理 近海海面高

文章编号 0001-5733(2004)02-0216-06 **中图分类号** P228 **收稿日期** 2003-04-24, 2003-10-21 收修定稿

WAVEFORM RETRACKING OF TOPEX/POSEIDON ALTIMETER IN CHINESE OFFSHORE

BAO Li-Feng¹ LU Yang^{1,2} XU Hou-Ze^{1,2}

1 Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China

2 Unite Center for Astror geodynamics Research, Shanghai 200030, China

Abstract Based on the character of T/P satellite altimetry return waveform, we present a method to retrack the waveform data and determine the retracking correction with function approach, then improve the precision of altimeter observations in offshore. For the South China Sea region, we have processed four cycles T/P altimeter waveform data. Compared with near time tide gauge data, the precision of the post-processing sea level height is greatly improved. We conclude that this method can be used to determine sea level height with high precision in offshore regions.

Key words Satellite altimetry, Waveform retracking, Waveform processing, Offshore sea level height.

1 引 言

卫星测高是随着卫星遥感测量技术发展起来的新型边缘学科. 自上个世纪 80 年代以来, 卫星测高技术在地球物理学, 大地测量学和海洋学等方面得到了广泛的应用, 国内外许多学者在不同领域做了

大量的研究, 取得许多成果^[1~11]. 由于受到测高仪观测条件的限制, 目前, 卫星测高技术主要应用于深海区域. 在靠近陆地、冰面区域, 由于测高数据质量不高, 很难开展研究工作. 实际上, 近海岸海面数据包含了许多有用的信息. 由于陆地表面散射作用的影响, 或当卫星测高仪的地面轨迹位于不同测量平面的交接面时(例如海面与陆面, 冰面与陆面等), 其

基金项目 国家自然科学基金项目(40374007), 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室研究基金 03-04-04.

作者简介 鲍李峰, 男, 1979 年生, 博士研究生, 目前主要从事卫星测高研究. E-mail: baolifeng@asch.whigg.ac.cn

反射波形会发生变形,导致观测到的卫星与瞬时海平面之间距离误差很大,造成观测数据质量的下降,往往在数据的预处理阶段即被剔除,因而在这些区域数据精度低甚至空白,影响了卫星测高数据在近海岸区域的实际使用效果^[4,8~11]。

近年来,人们通过重新确定波形及其测距阀门位置,求得测距改正量,再重新确定海面高观测值,借以改善原始观测值的精度,这种方法称为测高波形重构(Altimeter Waveform Retracking)。对此,进行了一些解算方法的研究和应用试验,如 Deng^[4] 等人分析比较了澳大利亚周边 ERS-1 和 Poseidon 测高卫星波形数据的回波波型; Brenner^[5] 等重新处理卫星测高回波信号来改善海面地形的精度;台湾学者 Hwang^[7] 在台湾西部海域利用 ERS-1 测高卫星的波形重构数据恢复浅海区域重力异常,得到了较好的结果。还有些学者将卫星测高波形重构技术运用于格陵兰岛、北极区域冰面监测。有些学者尝试将此技术用于监测内陆湖泊、河流水面变化、以及沙漠变迁的监测等^[5,8~11]。研究结果表明,在不同的地域、对不同的卫星必须采用不同的波形重构方法。

本文在借鉴国外同行处理 ERS-1 波形数据经验基础上^[8~10],根据 Topex/Poseidon (简称 T/P) 卫星实际情况,推导了利用 T/P 卫星波形数据重新计算海面高的计算方法,根据 AVISO 提供的最新版 T/P 卫星波形数据,在中国南海区域计算了四圈 T/P 测高卫星数据,并将试验结果与相同时间段的验潮站数据进行比较。

2 波形重构数学模型

发射机通过天线以一定脉冲重复频率向地球表面发射调制后的压缩脉冲,经海面反射后,由接收机接收返回的脉冲,并测量出发射脉冲与接收脉冲的时间差。根据此时间差以及返回的波形,便可以测量出卫星到海面的距离。对于卫星测高返回的单一斜率回波波形,一般可以用五个参数来表示,测高仪脉冲、反射波形与这五个参数之间的关系如图 1 所示。

五个参数含义分别为: β_1 为穿透深度; β_2 为回波功率强度,由此可判断反射面种类; β_3 为雷达脉冲从卫星到海洋表面的时间延迟; β_4 决定了回波波形的斜率,并提供了星下点有效波高的信息; β_5 决定回波波形的后缘,其值反映了海面的后向散射强度及海面风速信息。

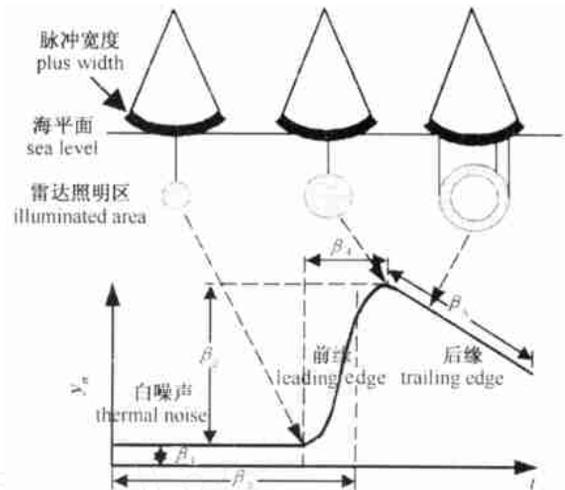


图 1 测高仪脉冲、反射波形与五参数之间的关系

Fig. 1 Relationship between satellite plus, returning waveform and five parameters

实际观测中,由于受多种因素的影响,卫星测高返回波形会产生很大异常^[4,8]。波形重构时,可以采用非线性最小二乘法来拟合实际观测值^[12],在此参照 Anzenhofer 处理 ERS-1 波形资料的经验^[8,9],根据回波波形的特征给出一非线性方程,利用最小二乘原理来拟合观测值 y_n

$$y_n = \beta_1 + \beta_2 (1 + \beta_5 Q) P \left(\frac{n - \beta_3}{\beta_4} \right). \quad (1)$$

回波功率采样 $n = 1, \dots, 60$, 式中误差函数 $P()$ 及 Q 的定义为

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^z e^{-\frac{q^2}{2}} dq, \quad (2)$$

$$Q = \begin{cases} 0, & n < \beta_3 + 0.5 \beta_4 \\ n - (\beta_3 + 0.5 \beta_4), & n \geq \beta_3 + 0.5 \beta_4 \end{cases}$$

其中, $q = \frac{n - \beta_3}{\beta_4}$ 。

对于 T/P 测高卫星,卫星测高仪每秒钟进行 20 次距离测量,每次测量返回的波形又由 128 个波形采样组成,波形采样间隔为 $t = 3.125\text{ns}$ 。卫星调制后的压缩脉冲传到地面时,波形数据压缩为 64 个功率采样,具体的压缩算法^[6]为:原来 128 个采样中,1~16 采样和 47~64 采样压缩为原来的一半,65~128 采样压缩为原来的四分之一。在 AVISO 发布的最新版 T/P 卫星波形数据光盘中,实际有效波形资料只有 60 个采样值。

在利用最小二乘法求定非线性方程(1)五个参数的过程中,计算结果对未知参数的先验值以及波形采样的权比较敏感,因此如何确定未知参数先验

值和权显得非常重要,根据 Anzenhofer^[9,10] 处理 ERS-1 波形资料的经验. 我们以重力中心偏移法 (OCOG)^[13] 给定未知参数先验值,OCOG 法的基本概念如图 2 所示.

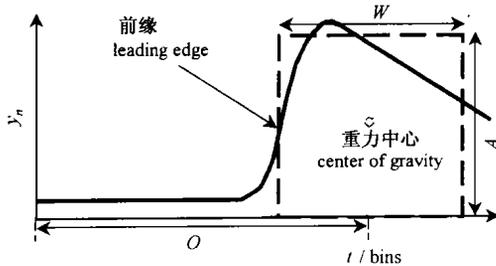


图 2 重力中心偏移法 (OCOG) 基本概念
Fig 2 Basic Conception of OCOG

图中,

$$O = \frac{\sum_{n=1}^{60} n y_n^2}{\sum_{n=1}^{60} y_n^2}, A_{mp} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{60} y_n^4}{\sum_{n=1}^{60} y_n^2}},$$

$$W = \left[\frac{\sum_{n=1}^{60} y_n^2}{\sum_{n=1}^{60} y_n^4} \right]^2, lep = O - \frac{1}{2} W, \quad (3)$$

式中, y_n 为回波采样功率, O 为重力中心位置, A_{mp} 为振幅, W 为宽度. lep 为前缘位置, 回波功率采样 $n = 1 \dots 60$.

重力中心法无须执行最小二乘运算,即可快速解算回波波形功率采样的重力中心位置、振幅、宽度和前缘位置. 由 Anzenhofer^[9,10] 处理波形资料的经验,令非线性方程 (1) 的五个参数的先验值为 $x_1^0 = 2, x_2^0 = A, x_3^0 = lep, x_4^0 = 3.5$ 及 $x_5^0 = -0.02$. 并分别对功率采样 $n = 1, 2, \dots, \text{int}(lep - 1)$ 赋权 $W_n = 200, n = \text{int}(lep - 1) + 1, \dots, \text{int}(lep + 1) + 2$, 赋权 $W_n = 50, n = \text{int}(lep + 1) + 3, \dots, 60$, 赋权 $W_n = 30$.

设未知参数向量 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$, 其值又可表达为:

$$x = x_0 + \Delta x, \quad (4)$$

其中, $x_0 = [x_1^0 \ x_2^0 \ x_3^0 \ x_4^0 \ x_5^0]^T$ 为未知参数的近似量, 初值已由 OCOG 法得到, $\Delta x = [\Delta x_1 \ \Delta x_2 \ \Delta x_3 \ \Delta x_4 \ \Delta x_5]^T$ 为五参数改正量. 由方程 (1), 附有参数的误差矩阵 V 为

$$V = A \Delta x - L. \quad (5)$$

上式中 A 为设计矩阵, L 为测高仪观测回波波形与由 x_0 根据非线性方程 (1) 计算求得的差值矩阵.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1}{\partial x_3} & \frac{\partial y_1}{\partial x_4} & \frac{\partial y_1}{\partial x_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1} & \frac{\partial y_n}{\partial x_2} & \frac{\partial y_n}{\partial x_3} & \frac{\partial y_n}{\partial x_4} & \frac{\partial y_n}{\partial x_5} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$L = [y_1 - y_1^0 \ y_2 - y_2^0 \ \dots \ y_{n-1} - y_{n-1}^0 \ y_n - y_n^0]^T, \quad (7)$$

$$\frac{\partial y_n}{\partial x_1} = 1, \frac{\partial y_n}{\partial x_2} = (1 + \frac{1}{x_2}) P,$$

$$\frac{\partial y_n}{\partial x_3} = \frac{\partial P}{\partial x_3} + B \frac{1}{x_3} \left[n \frac{\partial P}{\partial x_3} - \left(P + \frac{1}{x_3} \frac{\partial P}{\partial x_3} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x_3} \right],$$

$$\frac{\partial y_n}{\partial x_4} = \frac{\partial P}{\partial x_4} + B \frac{1}{x_4} \left[n \frac{\partial P}{\partial x_4} - \frac{1}{3} \frac{\partial P}{\partial x_4} - \frac{1}{2} \left(P + \frac{1}{x_4} \frac{\partial P}{\partial x_4} \right) \right],$$

$$\frac{\partial y_n}{\partial x_5} = \frac{\partial P}{\partial x_5}, \frac{\partial P}{\partial x_3} = - \frac{1}{4 \sqrt{2}} e^{-\frac{x_3}{2}},$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_4} = - \frac{n - \frac{1}{2}}{4 \sqrt{2}} e^{-\frac{x_4}{2}}.$$

$$B = 0, \text{如果 } n < \frac{1}{2} x_4; B = 1, \text{如果 } n \geq \frac{1}{2} x_4.$$

回波功率采样 $n = 1 \dots 60, y_n^0$ 为将 $x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0, x_5^0$ 代入方程 (5) 后所得的近似值, 由最小二乘定义, 可得,

$$x = (A^T W A)^{-1} A^T W L, \quad (8)$$

$W = \text{Diag}(W_1, W_2, \dots, W_{60})$ 为波形采样权阵. 另设为未知数中误差, 将 x 代入式 (5), 再计算中误差,

$$= \sqrt{\frac{V^T W V}{n - 5}}. \quad (9)$$

计算未知参数的收敛条件为 $|x_{i-1} - x_i| < 10^{-4}$, 其中 i 为迭代次数, $x_0 = 10^5$. 经过迭代运算以后, 即可确定非线性方程 (1) 中的五个参数, 此五个参数即为波形重构的结果. 由此, 波形重构的改正量 d_r 即为:

$$d_r = T_k \frac{c}{2} (x_3 - 28.5), \quad (10)$$

其中, T_k 为 T/P 卫星测高仪雷达脉冲宽度, $T_k = 3.125 \text{ ns}$, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 28.5 为返回波形采样中点, 这有别于 ERS 数据, 可由 T/P 卫星测高波形数据压缩算法推算.

3 实际计算结果与分析

本文采用了 AVISO 提供的四圈中国南海区域 (0°~25°N, 100°~125°E) T/P 卫星测高波形数据, 按表 1 列出的编辑准则^[10]对数据进行编辑处理, 并进行海面状态偏差改正、干项对流层延迟改正、湿项对流层延迟改正、电离层改正、弹性海潮改正、固体潮改正、电磁偏差改正、负荷潮改正和极潮改正等。由于 T/P 测高卫星轨道具有较高精度, 无须再进行轨道改正。另外, 由于 T/P 测高卫星波形数据光盘中并未包含反变气压计改正项, 在此, 我们根据波形资料光盘中提供的干项对流层路径延迟 (Dry_Corr) 和地理纬度 (ϕ) 来计算反变气压改正项 (Inv_Bar), 其值采用下式进行计算^[6] (单位为 mm) :

$$P_Atm = Dry_Corr / [- 22.77(1 + 0.0026\cos(2\phi))]$$

$$Inv_Bar = - 0.09948(P_Atm - 1013.25) \quad (11)$$

表 1 Topex/Poseidon 波形重定数据编辑标准
Table 1 Data edit criterion of waveform retracking of Topex/Poseidon

Topex/Poseidon	
陆地、冰层、雨层	FALSE
每秒钟返回有效波形数	12 NUM
卫星姿态角	0.0° < Att_WVF < 0.4°
自动增益控制	0dB < Agc < 37dB
自动增益控制中误差	0 < Agc_Rms < 0.8dB
有效波高	0mm < Swh < 11000mm
测距中误差	0mm < Rang_Rms < 250mm
干项对流层延迟改正	- 2500mm < Dry_Cor < - 1900mm
湿项对流层延迟改正	- 500mm < Wet_Cor < 0mm
电离层改正	- 400mm < Ion_Cor < 0mm
弹性海潮改正	- 5000mm < Ocean_Tide_Cor < 5000mm
固体潮改正	- 1000mm < Solid_Tide_Cor < 1000mm
负荷潮改正	- 500mm < Loading_Tide_Cor < 500mm
电磁偏差改正	- 500mm < Emb_Cor < 0mm
极潮改正	- 100mm < Pble_Cor < 100mm

表中右侧英文为左侧中文的相应缩写。

然后, 按照前面推导的方法计算该区域 1Hz 波形重构后的海面高。图 3 给出了其中一个实际观测到的波形采样与经过非线性最小二乘拟合波形重定后的波形比较。

图 4 为中国南海区域 T/P 测高卫星第 150 圈 190 号弧段的波形重构改正量, 由于 190 号轨迹为降弧, 在南海区域由陆地进入海洋, 故图中曲线开始时的波形改正量 C_r 较大 (47.9cm), 图中曲线出现的几个较大波形改正其地理位置在南海中沙群岛附近。

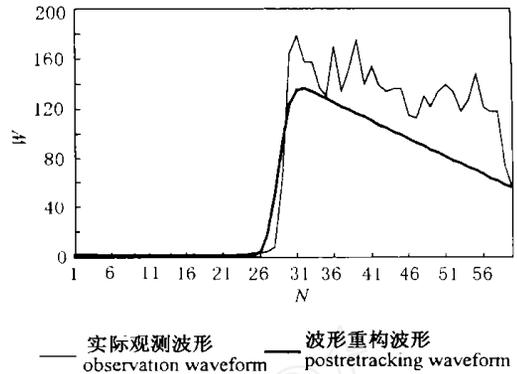


图 3 实际观测波形与波形重定后波形比较
W 为采样功率 (归一化单位), N 为波形采样点。

Fig. 3 Waveforms of Observation and Post-Retracking

可见, 在陆海交界地带波形重构改正量较大, 图中最大值可达 163cm, 在较深的海域波形重构改正量在 20cm 左右。

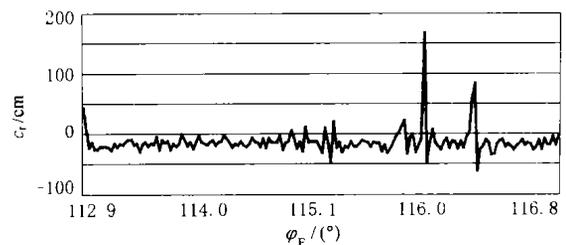


图 4 Topex/Poseidon 测高卫星第 150 圈 190 号轨迹波形重定改正量

Fig. 4 Waveform retracking correction of No. 190 track of cycle 150

为了检验由波形重构计算海平面高的有效性, 我们将卫星测高波形重构前和重构后计算所得的海平面高与相近时刻邻近验潮站海面高的观测数据进行比较。在研究区域内, 中国香港验潮站 B 站 (22°18'N, 114°13'E) 与 Topex/Poseidon 测高卫星地面轨迹最为接近, 实际观测中每圈波形资料中都有以验潮站为中心 0.25 范围内的观测值。将测高资料中离该站最近的星下点数据与相近时刻验潮站观测数据进行比较。因为验潮站资料为每小时一个观测值, 为了更为准确的比较, 我们将验潮站资料线性内插到卫星通过验潮站附近时刻的值。此外, 由于验潮站海水位观测值与卫星测高观测值所采用的数据基准不同, 并且卫星测高观测星下点不可能精确地落在验潮站站点上, 所以无法将卫星测高海水位观测数据与验潮站海水位观测值直接比较。在此, 我们将验潮站观测值以及测高卫星观测值转换到同一参考椭球面, 以大地高表示瞬时海水位高度。比较结果如图 5 所示。

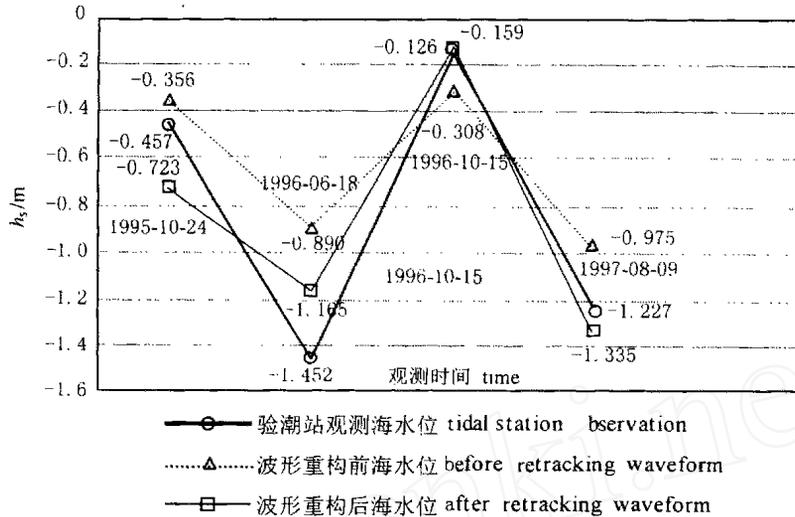


图5 香港验潮 B 站实际观测海水位与卫星测高波形重定前、后海水位比较
 h_s 为观测海水位高度

Fig. 5 Comparison between pre-retracking and post-retracking sea level height with observation in HongKong Tide Station B (Unit : m)

由图 5 可看到,经过波形重构后的海面更接近于验潮站观测海水位. 波形重构后的测高海面高与验潮站观测数据相比,其中误差为 $\pm 16.10\text{cm}$,而未进行波形重构的测高海面高与验潮站观测数据相比,其中误差为 $\pm 38.90\text{cm}$. 经过波形重构后,卫星测高近海面高观测值精度得到大幅度提高. 具体比较结果见表 2.

表 2 波形重定前后海水位与验潮站观测值比较(单位:m)
 Table 2 Comparison Between Pre-retracking and Post-retracking Sea Level Height with the Observations in Tide Station (Unit:m)

	波形重定前海水位与 验潮站观测值比较	波形重定后海水位与 验潮站观测值比较
有效比较个数	4	4
最小值(m)	-0.451	-0.108
最大值(m)	0.562	0.287
平均值(m)	0.054	0.031
中误差(m)	± 0.389	± 0.161
标准偏差(m)	± 0.445	± 0.182

4 结 论

本文利用一个附有五参数的非线性方程来拟合 Topex/Poseidon 测高卫星回波波形,通过最小二乘计算,计算波形重构的改正量,进而重新计算近海岸区域海面高度,提高该区域海面高度精度,为进一步研究提供高精度的海面高数据. 从波形重构结果

来看,波形改正量在靠近陆地时,改正量急剧变化,这一结论与其他学者处理 ERS-1、2 波形资料得出的结论一致. 另一方面,波形重构改正量在远离大陆的深水区域,其绝对值相对较小,这也说明本文介绍的波形重构方法的正确性. 将经过波形重构后的海面高与邻近验潮站海面高相比较,得到相近的变化趋势,说明了波形重构结果的可信性. T/P 测高卫星时间跨度从 1992 年延伸到 2002 年,通过处理其十多年波形数据,我们将可以得到高精度的近海岸海面高时间序列,为进一步研究近海区域海潮、海浪、近海大地水准面和重力异常以及他们的时变特征提供高精度的资料.

今后随着测高波形数据的不断积累,以及采用更为准确的地球物理改正模型和海岸线数据,由波形重构计算近海岸区域海面高将获得更好的精度和分辨率. 为将来进行深入的大地测量,地球物理以及海洋学研究提供更好的基础资料.

特别感谢中国台湾国立交通大学黄金维教授给予的无私帮助,感谢法国空间局 AVISO 工作中心提供的 T/P 卫星测高波形数据,Hawaii Univ. 提供的验潮站数据.

参考文献

[1] 王广运,王海瑛,许国昌. 卫星测高原理. 北京:科学出版社,1995
 Wang G Y, Wang H Y, Xu G C. The Theory of Satellite Altimeter (in Chinese). Beijing: Science Press,1995

- [2] 许厚泽,王海瑛. 利用卫星测高数据推求中国近海及邻域大地水准面起伏和重力异常研究. 地球物理学报, 1999, 42(4): 465 ~ 471
Xu H Z, Wang H Y. Geoid undulations and gravity anomalies from T/P and ERS-1 altimeter data in the China sea and its vicinity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, 42(4):465 ~ 471
- [3] 陈俊勇,李建成,晁定波等. 我国海域大地水准面的计算及其与大陆大地水准面拼接的研究和实施. 地球物理学报, 2003, 46(1): 31 ~ 35
Chen J Y, Li J C, Chao D B, et al. Geoid determination on China sea and its merge with the geoid in China mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(1):31 ~ 35
- [4] Deng X, Featherstone W, Hwang C, et al. Waveform retracking of ERS-1. *Mar Geod*, 2002, 25(1): 249 ~ 271
- [5] Brenner A C, Koblinsky C J, Zwally H J. Postprocessing of satellite altimetry return signals for improved sea surface topography accuracy. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(C1): 933 ~ 944
- [6] Dudley B Chelton, John C Ries, Bruce J Haines, et al. *Satellite Altimetry*. New York:Academic Press, 2001
- [7] Cheinway Hwang, Hsirn Ying Hsu. Marine gravity anomaly from satellite altimetry: a comparison of methods over shallow waters. Proceeding of International Workshop on Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics, and Oceanography, Wuhan, China, 10 September 2002
- [8] Berry P. Altimeter waveform retracking for land/ocean use. Proceeding of International Workshop on Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics, and Oceanography, Wuhan, China, 10 September 2002
- [9] Anzenhofer M, Gruber T. Fully reprocessed ERS-1 altimeter data from 1992 to 1995: Feasibility of the detection of long term sea level change. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(C4): 8089 ~ 8112
- [10] Anzenhofer M, Shum C K, Rensch M. Coastal Altimetry and Applications. Rep. of Dept. of Geod. Sci. and Surveying, Columbus: Ohio State University, 2001
- [11] Hayne G S, Hancock D W, Purdy C L, et al. The corrections for significant wave height and attitude effects in the TOPEX radar altimeter. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 24941 ~ 24955
- [12] Rodriguez E, Martin J M. Assessment of the TOPEX altimeter performance using waveform retracking. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(C12): 24957 ~ 24969
- [13] MSSL, An Exploratory Study of Inland Water and Land Altimetry Using Seasat Data, Final Report, ESTEC Contract No:6483/85/NL/B1, Mullard Space Science Laboratory (MSSL), UK:Dorking, 1987

本刊启事

各位作者与读者:

《地球物理学报》在大家的关爱下,于 1999 年再次成为美国科学信息研究所 (ISI) 检索系统 SCI 收录的少数中文期刊之一. 然而,由于作者在引用本刊发表的论文时,对《地球物理学报》使用了不同的外文译名,诸如 Acta Geophysica Sinica, Chinese J. Geophys., Chinese Journal Geophysics, Chinese J Geophys. (in Chinese), DIQIU WULI XUEBAO 等等. 这种情况使得 SCI 无法辨认哪一个名称属于《地球物理学报》,因而 SCI 不能给出本刊的真实影响因子(据了解). 为此,再次申明:请您在引用本刊发表的论文时(无论是向本刊或其他刊物投稿),对本刊刊名务必用以下的统一的英文译名: **Chinese J. Geophys. (in Chinese)**.

谢谢合作!