

# 由 ERS-1 波形重构确定我国近海平均海平面

鲍李峰<sup>1,2</sup>, 陆洋<sup>1,3</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 许厚泽<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;  
3. 中国科学院天文地球动力学联合研究中心, 上海 200030)

**摘要** 近海岸区域平均海面高在大地测量学、物理海洋学以及地球物理学研究中具有非常重要的意义。受各种条件的制约和限制, 目前卫星测高技术主要应用于深海区域, 在近海区域尤其是海岸线附近区域的应用几乎为空白。本文根据 ERS-1 测高卫星回波波特征, 采用五参数线性模型, 由最小二乘拟合方法, 对近海区域尤其是靠近海岸线附近的 ERS-1 测高波形数据进行波形重构。比较波形重构前、后解算平均海面高, 表明波形重构技术不仅明显改善了解算近海海面高的精度, 而且增加了近海测高海平面的分辨率, 并使卫星测高有效观测延伸至海岸线附近。随后, 本文利用波形重构后海面高数据构造了近海多年平均海平面, 并对我国近海海平面特征进行了初步分析。

**关键词** 卫星测高, 平均海平面, 波形重构, 近海

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)02-0427-05

## Coastal mean sea surface height by retracking ERS-1 altimeter waveform data

BAO Li-feng<sup>1,2</sup>, LU Yang<sup>1,3</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, XU Hou-ze<sup>1,3</sup>

(1. *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *Unite Center for Astro geodynamics Research, Shanghai 200030, China*)

**Abstract** A high resolution and high precision sea surface height data in the coastal region play an important role in many geodetic, oceanographic and geophysical applications. Constrained by many factors, applications of altimeter data are mostly in open sea, it is still blank in the coastal region. Base on the character of ERS-1 satellite altimetry return waveform and the investigative situation overseas, we retracked the raw ERS-1 altimeter waveform data from 1993 to 1996 using a five parameter model, focusing on the leading edge of the waveforms, with function approach. Comparison between before and after retracking ERS-1 altimeter waveform data show that retracking can improve the accuracy of estimated sea surface height and the resolution in the coastal region. The sea surface height from altimetry observations were also extended nearly to the shoreline. Re-tracked waveform data were used to derive a gridded mean sea surface in the Chinese coastal region. Some discussions about the re-tracking result and various factors that may effect retracking are made. It indicates that father research about retracking was required.

**Keywords** satellite altimetry, mean sea surface height, waveform retracking, coastal region

## 0 引言

卫星测高是 20 世纪 70 年代发展起来的一项高科技空间测量技术, 它以卫星为载体, 利用星载雷达测高仪连续向地球发射雷达脉冲, 并接收在地球表

面返回的脉冲回波, 通过分析处理, 计算出卫星距离星下点平均海平面相对参考椭球面的距离<sup>[1]</sup>。由于卫星测高能在全球范围内全天候准确地提供星下点瞬时平均海平面高度的观测值, 现已广泛应用于大地测量学、海洋学以及地球物理学等相关学科的研

收稿日期 2006-09-10; 修回日期 2006-11-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40374007)和 863 计划(2006AA12Z128, 2006AA12Z116)联合资助。

作者简介 鲍李峰, 男, 1979 年生, 副研究员, 2006 年毕业于中科院测量与地球物理研究所, 目前主要从事卫星测高和地球重力场研究。(E-mail: baolifeng@asch.whigg.ac.cn)

究中. 自 1992 年以来先后有 TOPEX/Poseidon、ERS-1/2、GFO、EnviSat、Jason-1 等测高卫星曾经或仍然投入运行中, 这些高精度的卫星观测数据为研究海平面变化、地球重力场、海底地形、海洋环流等提供了丰富的信息<sup>[2~3]</sup>.

目前, 受各种条件的制约和限制, 卫星测高技术主要应用于深海区域<sup>[4~7]</sup>. 对该项技术的应用, 也大多局限在对卫星测高观测数据的二次分析和处理, 很少涉及对测高原始回波波形数据的分析与处理. 在非纯海面区域, 如陆海交接、海冰交接以及近海区域, 由于测高返回波形相对理想回波波形存在形变, 使得所测距离不准. 此外, 由于近海区域海水较浅且岛屿繁多, 卫星高度计接收到的反射信号较弱, 同时各种地球物理改正失效, 造成测高观测资料在浅海区特别是沿岸附近的质量不高, 限制了卫星测高数据在这些区域的应用<sup>[2]</sup>.

实际上, 近海岸海平面数据包含了许多与人类生活密切相关的信息. 为充分利用近海岸区域卫星测高数据, 有必要对原始波形数据进行再处理和分析. 近年来, 国内外许多学者对卫星测高波形重构进行了一些解算方法的研究和应用试验<sup>[8~15]</sup>: 如 Deng 等<sup>[8]</sup>分析了澳大利亚周边 ERS-1 和 Poseidon 测高卫星回波波形特征; Brenner 等<sup>[9]</sup>利用波形重构改善海面地形的精度; 有些学者将卫星测高波形重构技术运用于格陵兰岛、北极区域冰面监测中<sup>[10]</sup>; 还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迁移等研究<sup>[11]</sup>.

本文在借鉴国内外同行波形重构经验基础上, 根据 ERS-1 波形资料实际情况, 利用波形重构技术重新计算了我国近海区域平均海平面高度. 为进一步研究近海区域海潮、大地水准面起伏和重力异常提供了高精度资料.

### 1 ERS-1 波形数据

目前, 一般测高卫星发布的通常为 1Hz 的二级产品, 即经过数据预处理后的数据, 通常有效数据一般都离海岸线有十几至几十公里的距离<sup>[8]</sup>. 要进行波形重构, 必须对原始测高波形数据或粗加工后的波形数据进行再处理才具有实际意义.

本文所使用的波形数据为原始 20 Hz ERS-1 波形数据, 它是仅次于原始感应器资料的初级产品. 每个观测记录包括测量时间、位置、回波采样功率以及各种参考观测改正参数等<sup>[16]</sup>. 波形数据地面轨迹分布如图 1 所示, 基本覆盖了我国近海水深小于

200 m 的全部区域(110°E~130°E, 20°N~42°N), 甚至在陆地、湖泊和河流水面上也有观测记录, 观测数据的时间跨度为 1993 年 6 月~1994 年 3 月, 1994 年 9 月~1996 年 6 月. 由于陆地电磁波反射非常复杂, 同时缺少准确的测高改正模型, 因此本文主要讨论浅海以及近海岸海陆交接区域卫星测高数据的波形重构.

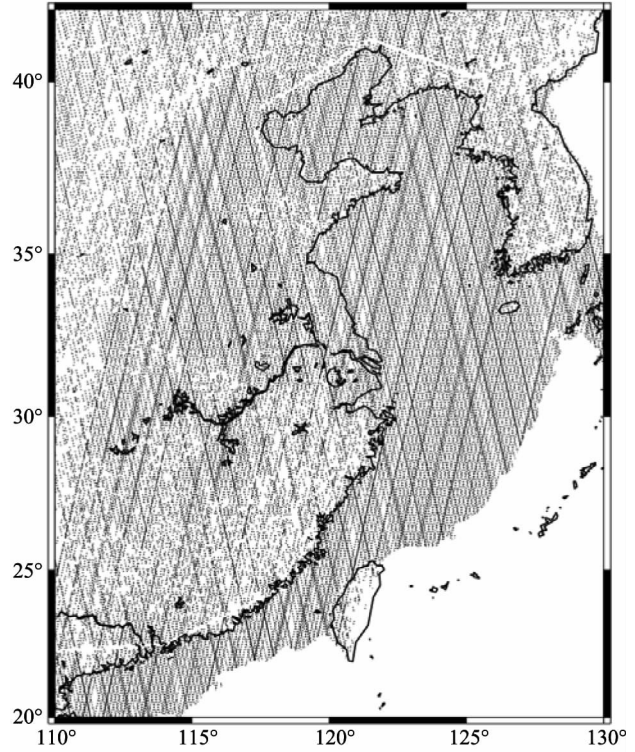


图 1 中国近海及其邻域 ERS-1 卫星地面轨迹空间分布  
Fig. 1 Ground-tracks of raw ERS-1 altimeter waveform data

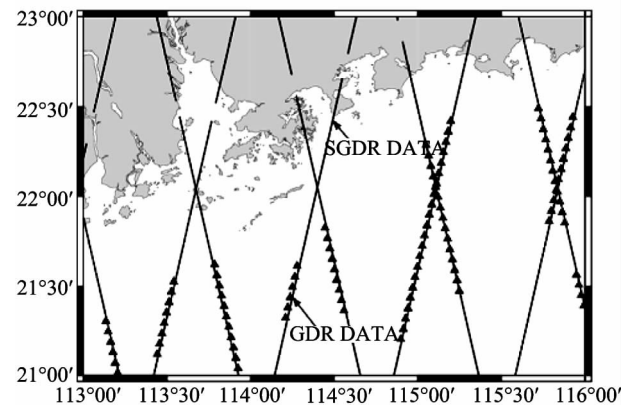


图 2 测高波形数据与地球物理记录数据地面轨迹比较  
Fig. 2 Comparison between ground-tracks of waveform data and GDR data

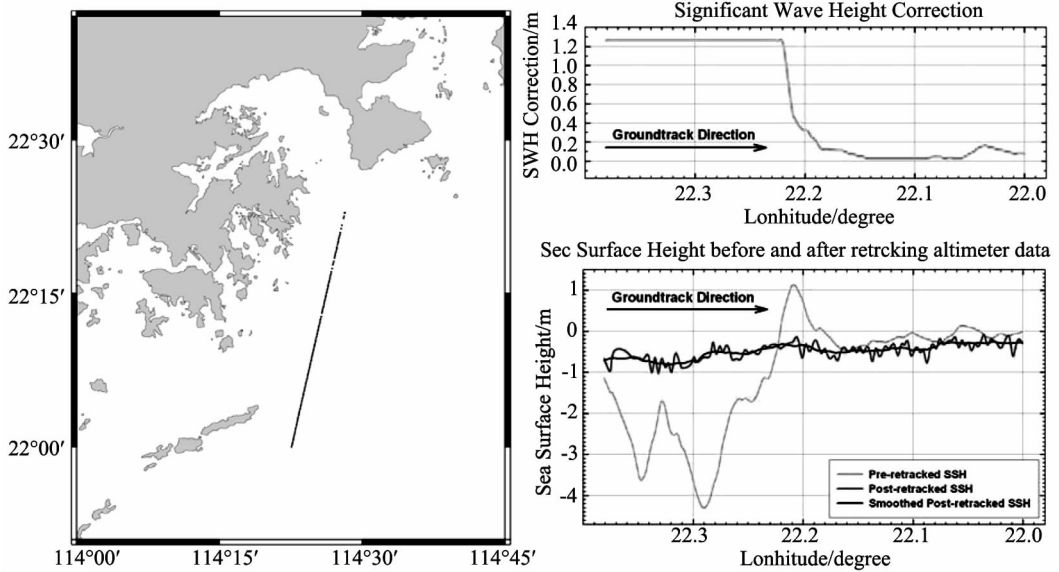


图 3 波形重构前、后海面高与有效波高改正 (m)

Fig. 3 Sea surface height before/after retracking and SWH correction (m)

图 2 为某一周期内中国香港附近 20Hz 测高波形数据(SGDR)与 1Hz 地球物理记录数据(GDR)地面轨迹比较. 由图可明显看出,测高波形数据地面轨迹分布更加连续、密集,观测记录一直延伸至海岸线附近,在陆地部分也有记录.

## 2 波形重构方法及结果

星载微波仪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信号,并测量出发射脉冲与接收脉冲的时间差. 根据此时间差以及回波波形特征,即可确定卫星至海面的距离<sup>[1]</sup>. 实际观测中,受多种因素影响,卫星测高回波波形相对理想波形可能会产生很大异常. 波形重构时,常采用最小二乘方法来拟合实际观测波形,通过重新确定回波波形以及测距阀门位置,求得测距改正量,再重新确定海面高观测值,借以改善解算海面高的精度,弥补数据空隙<sup>[2]</sup>,这对大地测量学、海洋学等相关学科研究都有着积极的意义.

由于本文研究区域主要为海陆交接或陆海交接,相对海冰交接等复杂情况,回波波形较为简单,一般为单一斜率波形. 因此,本文选择附有五参数的线性模型进行波形重构. 波形重构的基本原理与方法以及五参数模型处理步骤在文献[2,3,8~10,16]中已有详细叙述.

与文献[2,3,8~10,16]中 Topex/Poseidon 卫

星波形重构方法略有不同的是,ERS-1 返回波形采样数为 64,采样中点即测距阀门为 32.5,波形采样的间隔  $\Delta t = 3.03 \text{ nsec}$ ,采样间隔对应的波形改正量为 45.42 cm.

ERS-1 原始波形数据经最小二乘拟合波形重构后,再加入参考干项对流层改正、湿项对流层改正、电离层改正、弹性海潮改正、固体潮改正、负荷潮改正以及极潮改正,即可得到近海平均海面高观测值. 由于原始数据中未包含反变气压计改正项,我们根据干项对流层路径延迟( $P - \text{Atm}$ )和地理纬度( $\phi$ )来计算反变气压改正项( $\text{Inv} - \text{Bar}$ ),其值采用下式进行计算<sup>[1]</sup>(单位为 mm):

$$P - \text{Atm} = \text{Dry} - \text{Corr} / [-22.77(1 + 0.0026\cos(2\phi))], \quad (1)$$

$$\text{Inv} - \text{Bar} = -0.09948(P - \text{Atm} - 1013.25). \quad (2)$$

虽然现有全球海潮模型在浅海、沿岸以及个别封闭海地区误差较大,但实际上,海洋潮汐可近似作为随机现象对待,它是时间的函数,本文取近三年测高数据的平均来计算近海岸平均海平面高,可有效地抑制这种近似所带来的影响. 另外,由于星载传感器在卫星经过陆海交接面时可能工作异常,导致观测海面有效波高异常. 实际处理中,当观测有效波高大于 5 m 时,采用波形重构最小二乘拟合结果重新计算的电磁偏差改正代替参考海况偏差改正.

图 3 为中国香港海域附近某段实际波形数据,

波形重构前后所解算平均海面高的比较,图左为波形数据实际地面轨迹.由图可以明显看出,卫星轨迹在由陆地进入海洋过程中,卫星测高观测受浅海岛屿影响非常大,波形重构前解算的沿轨海平面倾斜甚至达到 $0.7\text{ m/km}$ ,具有明显的突变,显然这是错误的结果.在公开发布的GDR数据中,近海岸区域测高数据数据分布几乎为空白.而波形重构后的海面高明显消除了近海岸不合理的突变,使沿轨迹海面高连续平滑了许多,结果更为可信,由此可见波形重构之一斑.另一方面,波形重构不可避免会给沿轨海面高计算带来短波误差,在开阔海域,波形重构还使计算海平面高相对原有观测值产生系统性偏移.为降低波形重构带来的偏差并使计算结果与现有资料一致,先对波形重构后计算海平面进行平滑处理,然后通过计算远海区域波形重构前后平均海面高差异,将波形重构时间序列符合到原有观测序列.图3右上为与该段轨迹相应的参考海况改正(电磁偏差改正),由图明显看出,近海岸海域卫星高度计有效波高观测出现了较大异常,结果完全不能采用.本文计算中,当参考海况改正超过 $25\text{ cm}$ 时,用波形重构拟合过程中给出的有效波高拟合值替代参考有效波高观测值,该方法可以有效降低(减弱)有效波高观测异常带来的误差.

### 3 重构近海平均海平面

平均海面及其变化是当今地球科学和环境科学所关注的科学问题之一.卫星高度计测得的瞬时海面高经极潮改正、固体潮改正、电磁偏差改正以及负荷潮改正之后,得到所谓的平均海平面,但是这一定义本身并不具有时间平均的含义.如果想得到某段时间内的平均海平面,则需对上述概念下的平均海平面在该时间段上进行平均,以削弱来自海平面高异常变化短波误差的影响.

波形重构后沿轨海面高数据经过奇异点(突变超过 $\pm 2\text{ m}$ ,约占总点数 $3\%$ )剔除后,采用 $0.5\text{ s}$ 平滑窗进行平滑滤波,实际计算中,与均值差异超过 $0.5\text{ m}$ 的也不参加计算.经上述预处理后,即可得到沿轨波形重构改正后观测平均海平面高.本文波形重构后数据的格网化处理,选择一种局部加权拟合法,即GMT中数据网格化方法.按照内插点距离的远近进行加权平均,并组成近海海平面高网格文件,权函数为,

$$W_i = \left(1 + \frac{9r^2}{R^2}\right)^{-1}, \quad (3)$$

式中, $R$ 为局部搜索半径.网格空间分辨率为 $5' \times 5'$ ,局部拟合半径取2倍的格网间隔,如不能满足条件,可将局部拟合半径适当扩大以满足拟合要求.

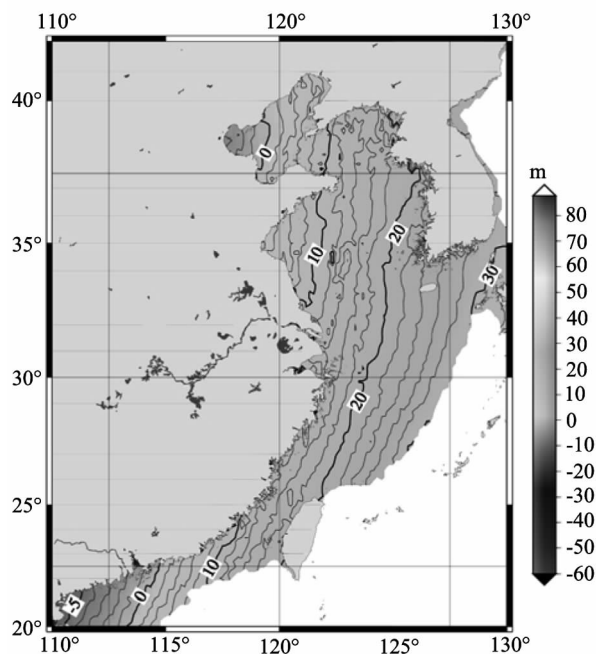


图4 中国近海岸及近海测高平均海平面

Fig. 4 Mean altimetry sea surface height in Chinese coastal regions from retracked ERS-1 waveform data

图4给出了中国近海岸及近海波形重构后的测高平均海平面,由图可看到在中国近海及其邻海的平均海平面总体上高于全球海平面,相对参考椭球呈西北向东南逐渐升高的倾斜状态,靠近我国大陆,平均海平面高度较小,而沿东南方向平均海平面高度逐渐加大,在东海大陆架区域变化较缓,而在陆架边缘变化较快,平均海平面的这种大尺度变化和海底地形的变化并不一致,可能是由于地壳均衡补偿作用引起的.与现有平均海平面模型比较,本文结果图形上较为相似,表明计算结果是可靠的.另一方面,由于本文重点为恢复近海岸区域平均海平面,填补该区域卫星测高数据应用空白,仅仅采用了ERS-1测高卫星波形数据,其中只包含一次大地测量任务,因此在远海区域数据分辨率和数据精度方面略低于现有平均海面高模型.

### 4 结论

以往研究结果表明卫星测高资料给出的中国近海平均海面高度分布具有较高的可信性.近海平均海面高度的确定不仅在监测海洋方面有着关键意

义,同时对海洋水深测量也十分重要,对改进海洋重力异常计算结果亦有意义。

本文根据测高回波波形几何和物理特征,利用波形重构技术,用一附有五参数的非线性方程来拟合 ERS-1 测高卫星回波波形,通过最小二乘计算确定波形重构改正量,进而改善了我国近海尤其是海岸线附近区域测高海面高的精度,填补了该区域卫星测高数据的空白。由波形重构后测高资料构造的近海平均海平面,其基本特征与现有认识基本一致,表明本文方法和结果是科学合理的。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,这将为进一步研究近海潮汐、洋流、海面地形、大地水准面和重力异常及其时变特征提供更为准确的基础资料。

虽然波形重构技术成功地解决了近海岸海域卫星测高数据的空白,但仅仅依靠波形重构尚未能达到深海区域卫星测高的观测精度,另外,波形重构不可避免会给原有观测带入计算偏差。为进一步提高近岸海域测高海平面的精度,还应考虑用验潮站实测数据和其他海洋学资料来约束波形重构后的测高平均海平面。精化波形重构方法,深入研究近岸海域卫星测高改正模型,以及如何精确评价波形重构后平均海平面,这些都是今后需要进一步研究的主要问题。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Chelton D B, Ries J, Harines B J, *et al.* Satellite altimetry, in Fu L L and Cazenave A (eds.), *Satellite Altimetry and Earth Sciences, a Handbook of Techniques and Applications*[J]. New York: Academic Press, 2002.
- [2] 鲍李峰,陆洋,许厚泽. 浅海区域 Topex/Poseidon 测高卫星数据波形重构方法[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 216~221.  
Bao L F, Lu Y, Xu H Z. Waveform retracking of Topex/Poseidon altimeter in Chinese offshore[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 216~221.
- [3] 褚永海. 卫星测高波形处理理论与技术 [硕士论文]. 武汉:武汉大学测绘学院,2004.  
Chu Y H. The theory and technology of waveform about satellite altimetry [M. D. thesis](in Chinese). Wuhan: Wuhan Univ., 2004.
- [4] 李建成,姜卫平,章磊. 联合多种测高数据建立高分辨率中国海平均海面高模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*,2001,26(1):40~45.  
Li J C, Jiang W P, Zhang L. High resolution mean sea surface over china sea derived fomr multi-satellite altimeter data [J]. *Geomatics and information Science of Wuhan Univ.* (in Chinese), 2001, 26(1): 40~45.
- [5] 陈俊勇,李健成,晁定波,等. 我国海域大地水准面的计算及其与我国大陆大地水准面拼接的研究和实施[J]. *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[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(1): 31~35.
- [6] 彭富清,张瑞华,石磐,等. 基于卫星测高的海域大地水准面[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 462~466.  
Peng F Q, Zhang R H, Shi P, *et al.* Marine geoid from satellite altimeter data[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(4): 462~466.
- [7] 姜卫平,李建成,王正涛. 联合多种测高数据确定全球平均海面 WHU2000[J]. *科学通报*,2002,47(15):1187~1191.  
Jiang W P, Li J C, Wang Z T. Global mean sea surface derived from multi-satellite altimeter data[J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, 47(15): 1187~1191.
- [8] Deng X L, Featherstone W, Hwang C, *et al.* Waveform retracking of ERS-1[J]. *Mar Geod.*, 2002, 25(1): 249~271.
- [9] Brenner A C, Koblinsky C J, Zwally H J. Postprocessing of satellite altimetry return signals for improved sea surface topography accuracy[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(C1): 933~944.
- [10] Martin T V, Zwally H J, Brenner A C, *et al.* Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88(C3): 1608~1616.
- [11] Hwang C W, Peng M F, Ning J S, *et al.* Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO[J]. *Geophysical Journal international*, 2005, 161(1): 1~11.
- [12] Hwang C, Hsu H Y. Marine gravity anomaly from satellite altimetry: a comparison of methods over shallow waters. *Proceeding of International Workshop on Satellite Altimetry for Geodesy*[J]. *Geophysics, and Oceanography*, Wuhan, China, 2002.
- [13] Rodriguez E, Martin J M. Assessment of the Topex altimeter performance using waveform retracking [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(C12): 24957~24969.
- [14] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(C4): 8089~8112.
- [15] Maus S, Green C M, Fairhead J D. Improved ocean-geoid resolution from retracked ERS-1 satellite altimeter waveforms [J]. *Geophys. J. Int.*, 1998(134): 243~253.
- [16] Anzenhofer M, Shum C K, Renstsch M. Coastal altimetry and applications[J]. *Rep. of Dept. of Geod. Sci. and Surveying*, Columbus: Ohio State Univ., 2001.