

郭金运,高永刚,常晓涛等. 近岸海域 EnviSat 卫星测高波形重定的 Threshold 优化算法. 地球物理学报, 2010, **53**(4): 807~814, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.005

Guo J Y, Gao Y G, Chang X T, et al. Optimal threshold algorithm of EnviSat waveform retracking over coastal sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(4): 807~814, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.005

近岸海域 EnviSat 卫星测高波形重定的 Threshold 优化算法

郭金运^{1,2}, 高永刚³, 常晓涛^{2,4}, 黄金维⁵

1 山东科技大学测绘学院, 青岛 266510

2 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室, 青岛 266510

3 福州大学环境与资源学院, 福州 350108

4 中国测绘科学研究院, 北京 100039

5 台湾交通大学土木工程学系, 台湾新竹 300

摘 要 波形重定是改善近岸海域卫星测高数据精度的一种有效方法. 分析了 EnviSat 雷达测高波形重定算法, 并对 Threshold 算法进行了优化, 开发了波形重定程序; 以地中海为实验区, 利用几种波形重定方法, 对近岸海域的 EnviSat 测高波形进行重定, 认为优化的 Threshold 算法是几种波形重定算法中最稳健的重定算法, 适合于地中海近岸海域 EnviSat 测高波形的重定, 对其他近岸海域的应用也有一定的参考意义.

关键词 EnviSat, 卫星测高, 波形重定, Threshold 算法

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.005

中图分类号 P228

收稿日期 2009-03-30, 2010-01-06 收修定稿

Optimal threshold algorithm of EnviSat waveform retracking over coastal sea

GUO Jin-Yun^{1,2}, GAO Yong-Gang³, CHANG Xiao-Tao^{2,4}, HWANG Cheinway⁵

1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

2 Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef of SBSM, Qingdao 266510, China

3 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

4 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

5 Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu 300, China

Abstract Waveform retracking is an effective method to improve the accuracy of sea surface height measurement with the satellite altimetric technique. The improved threshold retracking algorithm is optimized in the paper. Several waveform retracking algorithms are analyzed. Then a waveform retracking system is programmed. Several retracking methods are used to retrack the EnviSat waveform over the Mediterranean Sea. The improved threshold retracking algorithm is the most robust retracking method and more suitable for the EnviSat waveform retracking over the coastal Mediterranean.

Keywords EnviSat, Satellite altimetry, Waveform retracking, Threshold algorithm

基金项目 国家自然科学基金项目(40774009 和 40974004), 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室基金(2009B05 和 2009B06), 对地观测技术国家测绘局重点实验室基金(200801), 山东省泰山学者建设工程专项(TSXZ0502), 国家高技术研究发展计划(863)(2009AA121405)资助.

作者简介 郭金运, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间大地测量和天文地球动力学等研究. E-mail: jinyunguo1@126.com

1 引言

卫星测高技术能够大范围、高精度、周期性地探测海洋上的多种自然现象及其变化,其观测数据被广泛地应用于地球重力场模型、平均海面、海潮模型、海底地形和洋流等方面的研究^[1, 2]. 在现代科技条件下,卫星测高仪在深海区域测得海面高的精度可以达到 $\pm 2\sim 3$ cm. 然而,在近岸海域,沿海陆地地形、岛屿、潮汐、地球物理因素和仪器硬件响应等的影响造成雷达测高脉冲的反射波形不规则,无法精确地求得卫星与星下点反射面之间的距离^[3]. 因此,为了得到精确的距离观测值,需要重新确定波形前缘中点的位置,并通过与波形预设门比较,计算出波形重定距离改正值,对地球物理数据记录(Geophysical Data Record, GDR)中给出的卫星到海面的距离进行改正,此过程称为波形重定. 对卫星测高波形进行波形重定的主要目的是通过对波形前缘中点的重新确定来减少短波随机噪声,从而改善 GDR 中瞬时海面高的精度^[3]. 在近岸海域,由于对流层延迟、电离层延迟、地球物理改正、轨道和仪器校正等改正技术较为成熟,因此利用波形重定方法来改善卫星测高数据质量成为十分有效的手段.

EnviSat 是欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 2002 年 3 月发射的太阳同步卫星,轨道高度为 800 km,轨道倾角为 98° ,重复周期为 35 天 (<http://envisat.esa.int/>). 发布的 EnviSat 测高数据中 SGDR(Sensor Geophysical Data Record)为传感器数据,它除了包含 GDR 数据外,还包含由离散傅里叶变换和快速傅里叶变换算法分别处理得到的 18 Hz 的波形数据. GDR 数据中不仅包含常规数据,还包含了 EnviSat 利用 Ice-1、Ice-2、Sea-ice 和 Ocean1 等重定算法改正后的海面高. Ice-1 和 Ice-2 算法主要是针对冰面进行波形重定;Sea-ice 算法是针对海冰面回波进行波形重定;Ocean1 算法是针对海洋面回波进行波形重定^[4]. 针对近岸海域,本文中只采用了 EnviSat 利用星载的 Ocean1 算法重定的海面高作为比较研究对象.

为了改善近岸海域的卫星测高数据质量,本文在借鉴已有波形重定经验的基础上,对地中海区域近海岸的 EnviSat 18Hz 的测高波形数据进行了波形重定方法研究,设计了卫星测高波形重定软件,对 EnviSat 进行波形重定,并与 ESA 所提供的 EnviSat 利用星载 Ocean1 算法重定后的海面高以

及 EGM2008 大地水准面起伏进行了比较.

2 波形重定方法

波形重定方法主要用来确定出波形实际的前缘中点与设计门之间的偏移量,然后根据公式计算出距离改正值. 目前主要的波形重定方法有拟合算法(如 β 参数法)、重心偏移法(OCOG)、阈值(Threshold)方法等^[3, 5]. 本文研究中除了利用上述方法外,还采用了 Guo 等^[5]提出的改进 Threshold 算法,并且在研究中对该方法进行了进一步的优化.

2.1 β 参数算法

β 参数算法^[6]是美国国家航空航天局(NASA)的 Martin 等^[7]于 1983 提出的,该方法基于 Brown 平均脉冲反射模型,采用适当的参数函数对测高仪波形进行拟合. β 参数算法需要有良好的初始值,利用最小二乘平差或极大似然估计方法,通过迭代计算求得 β 参数,其中 5- β 参数法主要用于求解单一反射面反射的复杂波形,如图 1 所示. 但是如果波形

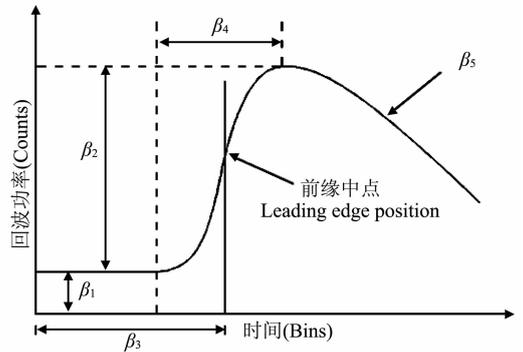


图 1 5- β 法示意图^[9]

Fig. 1 Schematic diagram of Five- β -parameter method

呈现尖锥形状时,使用 β 参数算法将会使计算迭代不收敛而无法得到计算结果. 本文研究中采用了 5- β 参数法的线性形式^[3, 6, 8~12], 即

$$y(t) = \beta_1 + \beta_2(1 + \beta_5 Q)P\left(\frac{t - \beta_3}{\beta_4}\right), \quad (1)$$

式中,

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

$$P(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{q^2}{2}\right) dq;$$

$y(t)$ 为 t 时的采样功率; β_1 为返回波形的热噪声; β_2 为回波功率强度; β_3 为前缘中点,由接收到能量至最大振幅的一半,可与预设门差值计算距离改正量; β_4 为波形前缘斜率,并提供了星下点有效波高信息;

β_5 为波形后缘斜率; $P(x)$ 为误差函数; Q 为线性函数, 它模拟波形后缘逐渐衰减的回波。

利用最小二乘法求解非线性方程(1)确定 5 个参数的过程中, 未知参数的初始值和波形采样功率加权的确定对计算结果影响显著。在本文研究中, 未知参数的初始值和权的确定采用了 Anzenhofer 等^[9]在处理 ERS-1 波形资料时所使用的方法。

2.2 OCOG(Off-Center of Gravity)算法

Wingham 等^[13]于 1986 年提出了 OCOG 算法, 如图 2 所示。OCOG 算法是基于统计规律得到的简

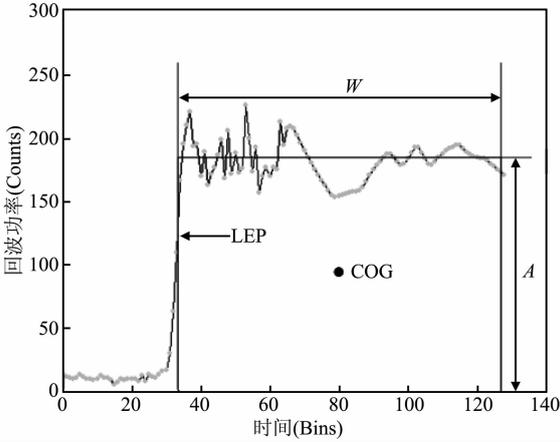


图 2 OCOG 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the OCOG method

单波形重定算法, 其基本思想是找到每个返回波形的重心, 以数值方式统计出波形振幅、宽度与重心位置。该方法计算简单方便, 但与反射表面的物理意义无关。为了降低热噪声对波形的影响, Deng^[3]在 2004 年对 OCOG 算法进行了改进。OCOG 算法的公式为

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4(t)}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t)}}, \quad (2)$$

$$W = \left(\frac{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t)}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4(t)} \right)^2, \quad (3)$$

$$\text{COG} = \frac{\sum_{i=1+n}^{N-n} iP_i^2(t)}{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t)}, \quad (4)$$

$$\text{LEP} = \text{COG} - \frac{W}{2}. \quad (5)$$

式中, N 为阀门的总个数; n 为波形开始和结束时应剔除的偏差波形个数; $P_i(t)$ 为波形的第 i 个阀门的功率值; A 为振幅; W 为宽度; COG (Center of Gravity) 为波形的重心; LEP (leading edge position) 为前缘中点。

2.3 Threshold 算法

Threshold 算法是 Davis 在 1997 年提出的, 利用 OCOG 计算的矩形, 根据振幅、最大波形采样等给出阈值, 在与前缘陡峭部分相交阈值的几个临近采样值之间进行线性内插, 以确定重点点^[14]。它是一种统计算法, 具有 OCOG 算法的优点, 并且比 OCOG 算法所确定的跟踪门的位置更精确。Threshold 算法^[11, 14]的公式为

$$P_N = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5}, \quad (6)$$

$$T_l = (A - P_N)Th + P_N, \quad (7)$$

$$G_r = G_k - 1 + \frac{T_l - P_{k-1}}{P_k - P_{k-1}}, \quad (8)$$

式中, P_i 、 P_k 分别为第 i 个、第 k 个阀门的功率值; P_N 为波形前 5 个阀门功率值的平均值; Th 为阈值; G_k 为第 k 个大于 T_l 的阀门; G_r 为前缘中点。

2.4 优化的 Threshold 算法

在顾及波形物理机制基础上, Guo 等^[5]提出了改进的 Threshold 波形重定算法, 其主要思想: 首先进行波形分析, 找出波形中所包含的子波形; 然后利用改进的波形公式进行重定。所谓子波形, 是指由于测高仪发射的微波脉冲受到陆地、海岸等地形影响, 在卫星观测波形中形成的具有多个波形前缘的波形, 这些多个波形前缘称为子波形^[15]。其判断为设第 i 个阀门对应的回波功率为 P_i , 令回波间隔功率差的均值为

$$d_2^i = \frac{1}{2}(P_{i+2} - P_i), \quad (9)$$

整个波形回波间隔功率差的标准差为

$$S = \sqrt{\frac{(N-2) \sum_{i=1}^{N-2} (d_2^i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-2} d_2^i \right)^2}{(N-2)(N-3)}}, \quad (10)$$

相邻回波功率差为

$$d_1^k = P_{k+1} - P_k \quad (k = i, i+1, \dots, i+j-1), \quad (11)$$

整个波形回波单差的标准差为

$$S_1 = \sqrt{\frac{(N-1) \sum_{i=1}^{N-1} (d_1^i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-1} d_1^i \right)^2}{(N-1)(N-2)}}. \quad (12)$$

图 3 为子波形的判断流程图。在本文研究中, 判断子波形时采用的开始阀门 i 为 10, 结束阀门 n 为 118, 子波形的判断标准为 $\epsilon_1 = 0.2S$, $\epsilon_2 = 0.2S_1$, 门阈值为 0.3。

利用上述方法, 对整个波形进行搜索, 确定一个波形中所含的所有子波形, 然后利用公式(13)确定

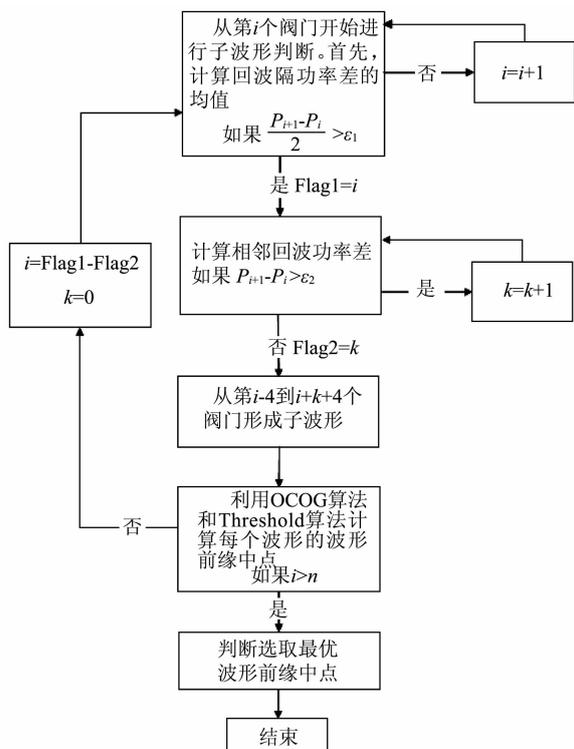


图3 优化的 Threshold 算法的计算流程

Fig. 3 Flow chart of the improved threshold retracking

出每个子波形的功率门限值:

$$T_l = T_n + Th \times A, \quad (13)$$

式中, A 由公式(2)确定; T_n 为子波形中第二个阀门的波形功率值.

对于每个子波形, 其波形前缘中点位置可以通过公式(2)、(6)、(8)和(13)计算得到. 利用此方法, 一个波形可能确定多个前缘, 计算得到多个重定后的距离改正, 但在这些改正中只有一个是准确的, 本文研究中采用了最小重定距离改正的方法确定重定后的距离.

2.5 波形重定距离改正计算

经波形重定后, 可以确定出波形的实际前缘中点的位置; 根据波形设计阀门的位置以及光速, 可以计算出重定距离改正 d_r .

$$d_r = \frac{c \times \Delta Ga}{2} \times (G_r - G_0), \quad (14)$$

式中, ΔGa 为一个阀门时间间隔 (EnviSat 中当脉冲宽度为 320 MHz 时, 阀门时间间隔为 3.125 ns); c 为光速 (即 299792458 m/s); G_r 为波形重定后的前缘中点的位置; G_0 为波形设计阀门的位置. 对于不同的测高卫星, 其波形设计阀门的位置不同, 而对于同一颗测高卫星当采用不同的数据记录格式或者同一记录格式下采用的阀门起止范围不同时, 其设计阀门的位置也不相同. 如 EnviSat 的设计阀门位置,

当阀门起止范围是 0~127 时, 其设计阀门为 45; 当阀门起止范围是 1~128 时, 其设计阀门为 46^[4].

3 波形重定软件设计

基于上述波形重定方法, 本文利用 FORTRAN 和 Matlab 语言进行了波形重定软件设计. 如图 4 所示, 该软件通过对测高波形进行重定, 以及引入外部判断准则, 最后得到改正后的海面高 (Sea Surface Height, SSH)、海平面异常值 (Sea Level Anomaly, SLA) 以及 IMP 值 (Improvement Percentage, 见公式(15)). 重定软件中各组成部分的功能如下:

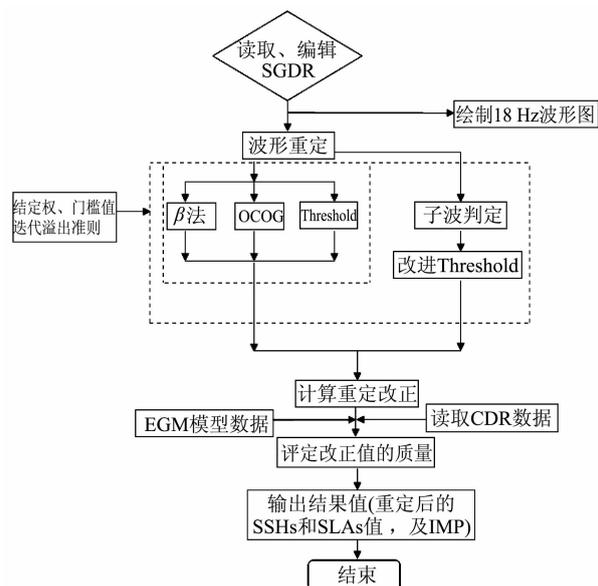


图4 波形重定软件流程

Fig. 4 Flow chart of waveform retracking program

(i) SGDR 数据的读取与编辑: 使用默认的标志读取并编辑 SGDR 数据, 输出 18 Hz 的波形数据并绘制波形图;

(ii) 波形重定: 使用所有的重定方法对波形进行重定. 首先需要利用 OCOG 算法对波形进行重定, 然后将其结果作为其他重定算法的先验值; 对于 $5-\beta$ 算法, 在重定时要引入波形采样功率的加权值及迭代溢出准则; 而改进的 Threshold 算法需进行子波形判断, 然后利用 OCOG 和 Threshold 算法计算出各波形的波形前缘中点, 并通过判断选取最优的前缘中点.

(iii) 重定结果评判: 引入 EGM2008 模型的大地水准面高数据作为重定结果的评判准则, 然后输出重定后的 SSH、SLA 以及 IMP 值.

4 EnviSat 测高波形重定

地中海是世界上最大的陆间海,面积约 250 多万 km²,平均深度 1450 m,最深处 5092 m,海域中有南欧三大半岛及西西里岛、撒丁岛、科西嘉岛等岛屿^[16]。本研究选择地中海海域为实验区,给出 EnviSat 几种波形重定方法的结果。

EnviSat 有多个 Pass 通过地中海,在本文研究中选取了其中 Cycle59 的 Pass801 作为研究对象(如图 5 所示),该 Pass 穿过科西嘉岛,经过撒丁岛东部海域,最近距离撒丁岛 15.1 km 左右。由于 40°N~43.3°N 之间的 GDR 数据质量太差而无法使用,所以研究区域选为 38°N~40°N 和 43.3°N~44.3°N。本研究采用了 5 种波形重定方法对 EnviSat 的 18 Hz(128bins)测高波形进行了重定,并将重定结果与 EGM2008^[17]确定的大地水准面起伏进行比较,通过计算 IMP 值判断重定结果的质量。

利用 IMP 值来判断重定后海面高质量的方法是 Hwang 等^[8]于 2006 年提出的,其计算公式为

$$\text{IMP} = \frac{\delta_{\text{raw}} - \delta_{\text{retracked}}}{\delta_{\text{raw}}} \times 100\%, \quad (15)$$

式中, δ_{raw} 为未重定的海面高与大地水准面高差值的标准差; $\delta_{\text{retracked}}$ 为重定后的海面高与大地水准面高差值的标准差。若 IMP 为负值,表明加入重定距离改正后的海面高比未重定前的海面高精度低。

表 1 和表 2 给出了在两个研究区域内各波形重定方法的波形重定成功率和 IMP 值,其中 EnviSat-ocean1 的各项数据是由 EnviSat 的 GDR 数据中所提供的利用星载 Ocean1 重定算法^[4]重定的海面高(18 Hz)计算得到。除 5- β 参数法在两个区域的波形重定成功率分别为 86.97% 和 78.27% 外,其他方法的波形重定成功率均为 100%。利用不同重定方法计算得到的 IMP 值不同,其中 OCOG 算法的重定结果最差,主要是由于 OCOG 算法使用了全部的波形数据,而当波形受到近海岸地形、地球物理环境、硬件和偏离星下点等的影响时,波形中含有较大的噪声,使得利用 OCOG 算法得到的海面高精度较低,所以 OCOG 算法主要用来为其他算法求定初始值。利用本文优化的 Threshold 算法和 Guo 等的原始算法计算得到的 IMP 值较其他算法计算得到的 IMP 大,表明该算法的重定效果最好。

在本文研究中,采用了以下两个准则判断波形重定方法的好坏:(1)波形重定成功率,即可重定波形个数与波形总个数之比;(2)IMP 值和重定后海面高的平滑度,所谓海面高的平滑度是指相邻点的海面高之间的差值要小,不能产生大的突变,保持良好的光顺性。图 6 和图 7 是利用本文提到的 5 种重定算法计算得到的海面高与由 EGM2008 模型计算得到的大地水准面高以及 EnviSat 的 SGDR 数据中提供的利用星载 Ocean1 算法重定的海面高的对比图。比较图 6 和图 7 可知,利用 Threshold 算法和

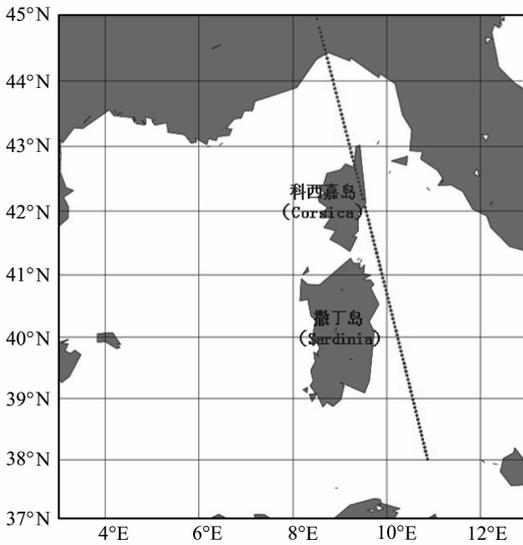


图 5 Cycle 59 pass 801 通过地中海的地面轨迹

Fig. 5 Cycle 59 and pass 801 of EnviSat over Mediterranean

表 1 43.3°N~44.3°N 范围波形重定结果对比表

Table 1 Statistics of waveform retracking over 43.3°N~44.3°N

重定方法	总波形个数	重定波形个数	重定成功率/(%)	$\delta_{\text{raw}}/\text{m}$	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP(%)
5- β	307	267	86.97	0.209	0.084	59.8
OCOG	307	307	100	0.214	0.220	-2.8
Threshold	307	307	100	0.214	0.090	57.9
Improved threshold-I	307	307	100	0.214	0.088	58.9
Improved threshold-II	307	307	100	0.214	0.086	59.8
EnviSat-ocean1	307	307	100	0.214	0.088	58.9

表 2 38.0°N~40.0°N 范围波形重定结果对比表

Table 2 Statistics of waveform retracking and Standard deviation of differences between raw SSH, retracked SSH and geoidal heights (EGM2008) and improvement percentage (IMP)

重定方法	总波形个数	重定波形个数	重定成功率/(%)	$\delta_{\text{raw}}/\text{m}$	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP/(%)
5- β	612	479	78.27	0.119	0.097	18.5
OCOG	612	612	100	0.119	0.207	-73.9
Threshold	612	612	100	0.119	0.086	27.7
Improved threshold-I	612	612	100	0.119	0.085	28.6
Improved threshold-II	612	612	100	0.119	0.084	29.4
EnviSat-ocean1	612	612	100	0.119	0.097	18.5

注: Improved threshold-I 为改进的 Threshold 算法^[5]; Improved threshold-II 为优化的 Threshold 算法。

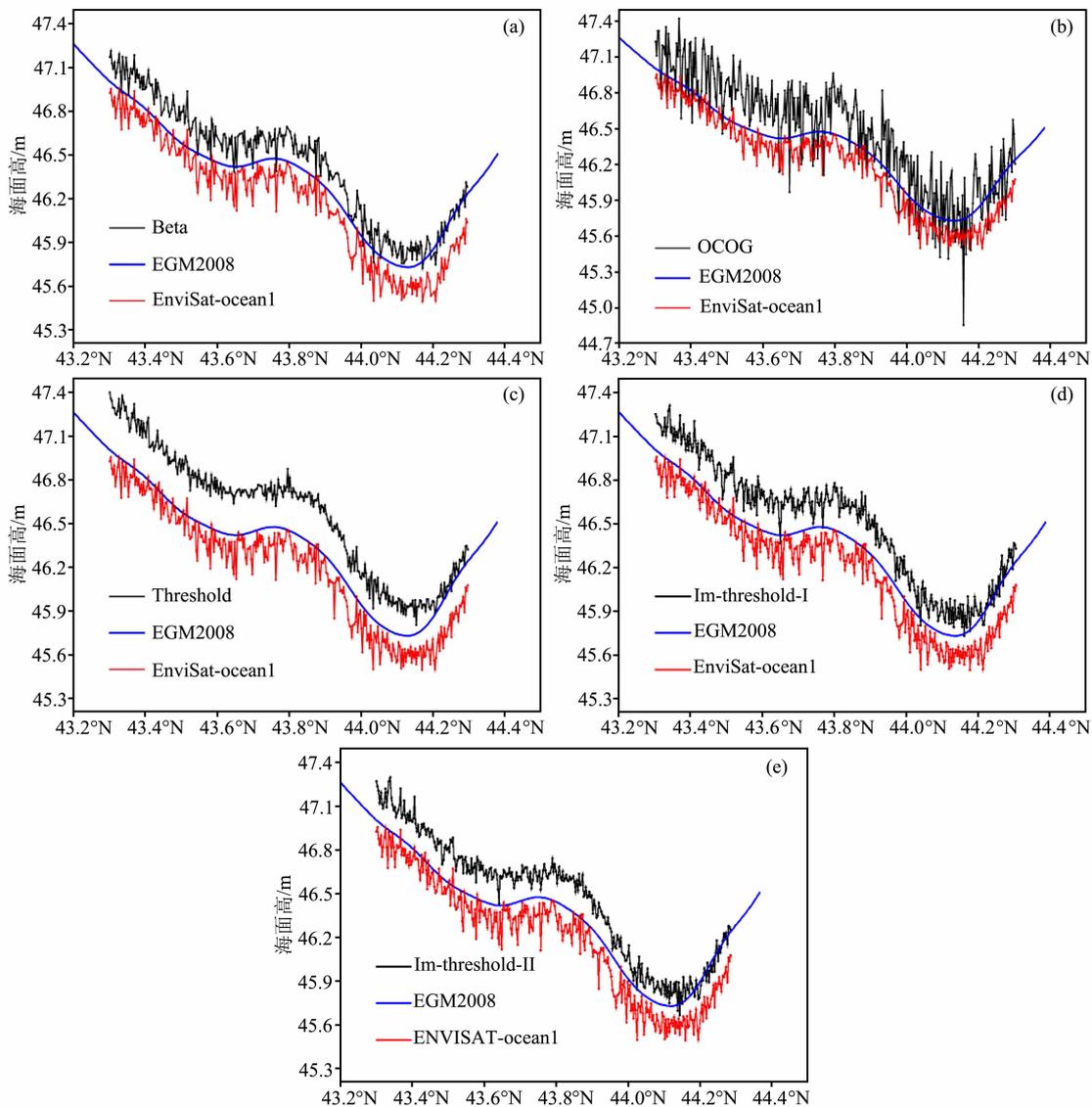


图 6 43.3°N~44.3°N 重定后海面高与大地水准面高的对比

Fig. 6 Comparison of retracked SSHs and geoidal heights over 43.3°N~44.3°N

改进的 Threshold 重定后的海面高较利用星载 Ocean1 算法重定的海面高平滑, 并且重定后的海面高与 EGM2008 模型计算得到的大地水准面高更相似, 且两种改进的 threshold 方法重定后的海面高平滑等十分接近. 综合表 1 和表 2 可知, 近海岸波形重

定中优化的 Threshold 算法是目前较好的一种重定算法. 对比表 1 和表 2 可知, 两个试验区域利用相同的波形重定方法进行波形重定后, 海面高的改善程度不同. 在 38°N~40°N 范围内, Pass801 的地面轨迹距岛屿和海岸较远, 最近处为 40.8 km, 除 38.0°N~

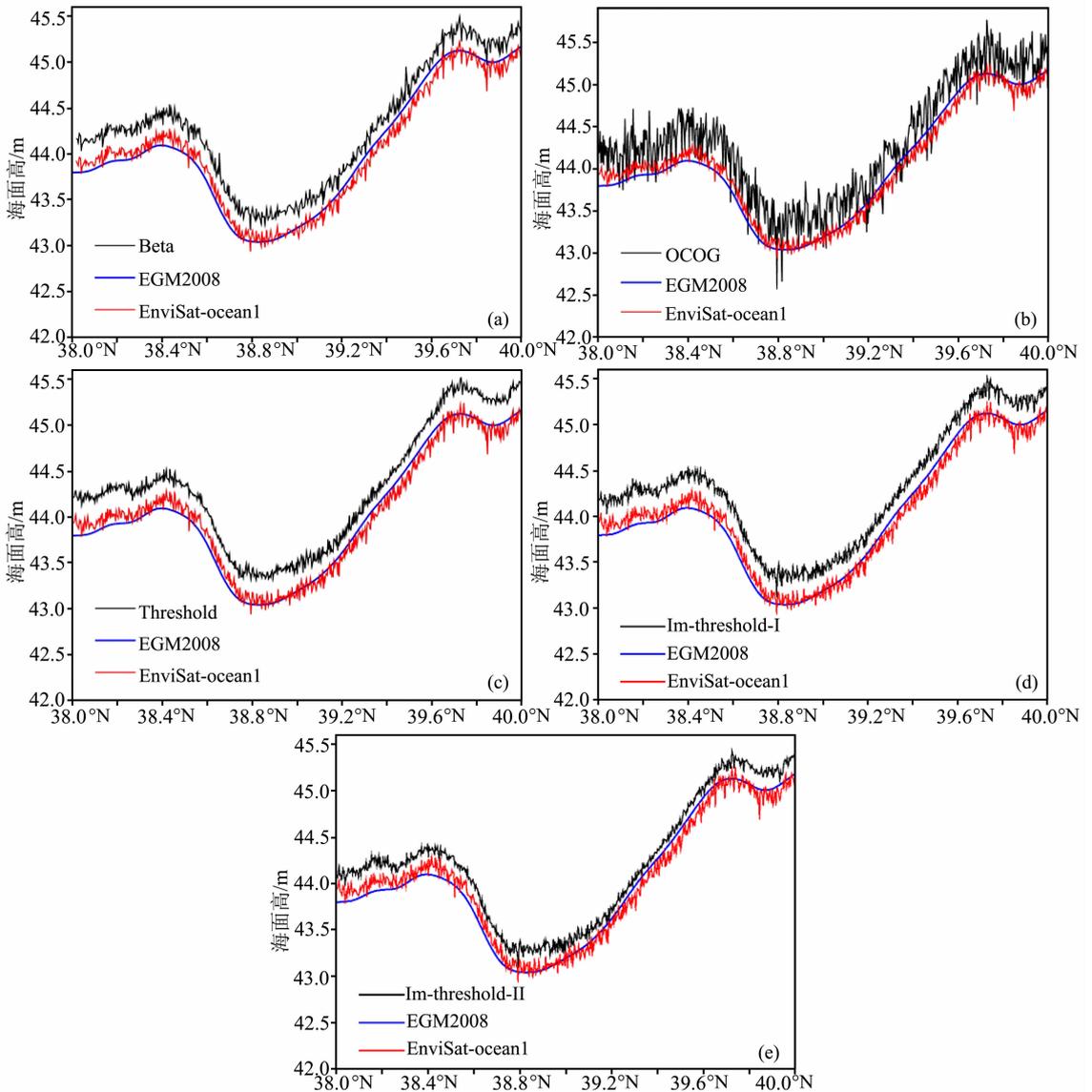


图7 38.0°N~40.0°N 范围重定后海面高与大地水准面高的对比

Fig. 7 Comparison of ocean SSHs and retracked SSHs along EnviSat track cycle 59 and pass 801(EGM 2008)

38.6°N 的水深达到-390 m~-1300 m 外,其余区域的水深都低于-1700 m,测高波形为海洋波形和似海洋波形,其质量较好,因此 GDR 中未重定的海面高的精度较高,所以重定后海面高的改善效果不明显;在 43.3°N~44.3°N 范围内,Pass801 的地面轨迹距岛屿和海岸较近,最近处为 6.6 km 左右,水深最浅处为-208 m 左右,大部分区域的水深高于-1700 m,离最近海岸的距离均小于 40 km,测高波形为似海洋波形和阶梯状波形,其质量相对较差,因此 GDR 中未重定的海面高的精度相对较低,所以重定后海面高的改善效果明显.因此,在近岸区域进行波形重定是十分必要的,可以显著提高卫星测高

数据的精度及其可用数据量.

Vignudelli et al.^[18] 曾利用 TOPEX/Poseidon (T/P) 的 GDR 数据获得科西嘉海峡的 SLA,并与利用 MSS CLS01 和 LEGOS 计算得到的平均海平面进行比较,得到较好的结果. Fenoglio-Marc 等^[19] 利用 T/P 的 GDR 和 R-GDR 数据以及 ERS-2 的 GDR 数据对地中海区域的 SLA 进行了研究,并将结果与潮汐测量数据进行了比对.在他们的研究中仅使用了测高卫星的 GDR 数据没有进行波形重定的研究.与他们的研究相比,采用波形重定后的 GDR 数据得到的 SSHs 的精度显著提高,SLA 偏差在±15 cm 之间,并且无需在一定限制条件对 GDR 数据进行预处理.

5 结 论

本文探讨了近岸海域卫星测高波形重定方法,以地中海为例利用 5 种波形重定方法对 EnviSat 测高波形进行了重定研究. 由于 OCOG 算法使用了全部的波形数据,而当波形受到近海岸地形、地球物理因素、硬件和偏离星下点等的影响时,波形中含有较大的噪声,使得利用 OCOG 算法得到的海面高精度较低,所以 OCOG 算法主要用来为其他算法求定初始值. 除 OCOG 算法外,其他波形重定方法可以显著提高 EnviSat 在近岸海域 GDR 数据的精度,其中优化的 Threshold 方法的重定结果是最好的. 这说明该方法较适合于近岸测高波形的重定,但该方法对于不同的测高卫星需采用不同的子波形的判断标准. 当 IMP 值越大,重定后的海面高越平滑,那么这种波形重定方法的重定效果就越好. 通过研究表明,波形重定方法可以有效改善近岸海域卫星测高 GDR 数据的质量,增加近海岸海域测高数据的利用率,使得测高数据可以用近岸区域大地测量、大地水准面和重力异常确定、地球物理、物理海洋等方面的研究.

致 谢 感谢德国 Technische University Darmstadt 提供的 EnviSat 的 SGDR 数据.

参考文献 (References)

- [1] Fu L L, Cazenave A. Satellite altimetry and earth sciences; a handbook of techniques and applications. San Diego: Academic Press, 2001
- [2] 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 Altimetry (in Chinese). Beijing: Science Press, 1995
- [3] Deng X L. Improvement of geodetic parameter estimation in coastal regions from satellite radar altimetry [Ph. D. thesis]. Perth: Curtin University of Technology, 2004
- [4] European Space Agency (ESA). EnviSat RA2/MWR Product Handbook. ESA Issue 2.1, 2006
- [5] Guo J Y, Hwang C W, Chang X T, et al. Improved threshold retracker for satellite altimeter waveform retracking over coastal sea. *Progress in Natural Science*, 2006, **16**(7): 732~738
- [6] Martin T V, Zwally H J, Brenner A C, et al. Analysis and tracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms. *J Geophys. Res.*, 1983, **88**(C3): 1608~1616
- [7] Brown G S. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE Trans Ant Prop*, 1977, AP-25 (1): 67~74
- [8] Hwang C, Guo J, Deng X, et al. Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data. *J Geod.*, 2006, **80**: 204~216
- [9] Anzehofer M, Shum C K, Rentsch M. Coastal altimetry and applications. Rep 464, Dept Geod Sci and Surveying, Ohio State University, Columbus, 1999
- [10] Hwang C, Hsu H, Deng X. Marine gravity anomaly from satellite altimetry: a comparison of methods over shallow waters. Berlin: Springer, *International Association of Geodesy Symposia*, 2003, **126**: 59~66
- [11] 高永刚, 郭金运, 岳建平. 卫星测高在陆地湖泊水位变化监测中的应用. *测绘科学*, 2008, **33**(6): 73~75
Gao Y G, Guo J Y, Yue J P. Lake level variations measured with satellite altimetry (in Chinese). *Science of Surveying and Mapping* (in Chinese), 2008, **33**(6): 73~75
- [12] 褚永海, 李建成, 张 燕等. EnviSat 测高数据波形跟踪分析研究. *大地测量与地球动力学*, 2005, **25**(1): 76~80
Chu Y H, Li J C, Zhang Y, et al. Analysis and investigation of waveform retracking data of EnviSat. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2005, **25**(1): 76~80
- [13] Wingham D J, Rapley C G, Griffiths H. New techniques in satellite altimeter tracking systems. Proc IGARSS'86 Symp, Zurich, 1986. 1339~1344
- [14] Davis C H. A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeter. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, 1997, **35**(4): 974~979
- [15] Guo J Y, Gao Y G, Hwang C W, et al. A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 2009, doi: 10.1007/s11430-009-0171-3
- [16] 地中海. <http://baike.baidu.com/view/15817.htm>, [2008. 12. 8]
Mediterranean Sea. <http://baike.baidu.com/view/15817.htm>, [2008. 12. 8]
- [17] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. The 2008 General Assembly of the European Geoscience Union, Vienna, Apr 13~18, 2008
- [18] Vignudelli S, Cipollini P, Roblou L, et al. Improved satellite altimetry in coastal systems: Case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea). *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L07608, doi: 10.2929/2005GL22602
- [19] Fenoglio-Marc L, Vignudelli S, Humbert A, et al. An assessment of satellite altimetry in proximity of the Mediterranean coastline. 3rd EnviSat Symposium Proceedings, ESA Publications Division, 2007. SP-636