

Jason-2 高度计数据在中国四大海域的 波形重跟踪与分析

翟振和¹ 孙中苗¹

1 西安测绘研究所, 陕西 西安, 710054

摘要:在 Brown-Hayne 模型基础上,利用迭代最小二乘算法实现了回波波形参数的重跟踪,同时利用重心偏移算法(OCOG)、阈值算法对 Jason-2 卫星的波形数据在中国渤海、黄海、东海、南海 4 个海域开展了波形重跟踪试验。试验表明,在 4 个海域,Brown-Hayne 模型法获得的波形重跟踪结果相比较于阈值法、OCOG 算法与法国空间局(CNES)公布结果最为一致,相互较差的标准差约 2 cm 左右。50% 阈值算法获得的波形重跟踪结果相比较于其它阈值精度更优,与 CNES 比较其标准差在 3~6 cm,但存在 4~10 cm 的系统偏差。OCOG 算法获得的结果存在较大误差,但其结果可作为 Brown-Hayne 模型解算的初始值。当卫星地面轨迹靠近大陆时,波形重跟踪获得的海面高改正量会较宽阔海域增大,其中南海区域的海面高改正量最大,可达 1 m,其原因可能是卫星地面轨迹经过了西沙群岛,雷达回波波形受到了一定的影响。

关键词:波形重跟踪;Brown-Hayne 模型;重心偏移算法;阈值算法

中图法分类号: P228

文献标志码: A

波形重跟踪(waveform retracking)是海洋测高卫星数据处理中的一项关键技术,对于获取高精度海面高、海浪高、风速等地球物理参数以及提高沿轨海面高数据分辨率具有重要作用。国内外学者利用重心偏移重跟踪算法(offset centre of gravity retracker)、 β 参数法、阈值法、改进阈值法等对 T/P、ERS-1、Envisat、Geosat 等测高卫星开展了波形重跟踪计算与分析,获得了大量有价值的结论和研究成果^[1-7]。上述的波形跟踪算法大都基于经验函数,而实际上传统雷达测高卫星的回波波形可由 Brown-Hayne 模型进行表示,该模型基于雷达回波波形的物理特征给出了描述波形能量的卷积表达式^[8-9]。Jason-2 卫星搭载了高性能的“海神-3”雷达高度计,其海面高测量精度在 2 m 有效波高、1 Hz 采样条件下优于 3.4 cm,其测量水平代表了目前国际先进水平,目前国内学者对 Jason-2 卫星方面的研究偏少。特别是在 Brown-Hayne 模型具体实现过程中,少有文献涉及到回波功率关于 5 个参数偏导数的推导,同时也缺乏在我国海域的计算分析。为此,本文将结合 Jason-2 的 SGDR(sensor geophysical data record)数据对基于 Brown-Hayne 模型的波形重跟

踪算法进行研究,同时与其他算法进行比较分析。

1 重心偏移重跟踪算法

重心偏移重跟踪算法由 Wingham 算法发展而来,其目的是根据不同波形门数的能量水平获取每个波形的重心。波形的振幅 A 和宽度 W 以及波形重心对应的门位置 COG 表示为^[10]:

$$A = \frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^1(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)} \quad (1)$$

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)\right)^2}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)} \quad (2)$$

$$COG = \frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} iP_i^2(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)} \quad (3)$$

式中, n_1 、 n_2 分别表示受波形起始和结尾混淆影

收稿日期: 2013-11-23

项目来源:国家高分辨率对地观测专项青年创新基金资助项目(GFZX04060103-7-14);国家自然科学基金资助项目(41174017)。

第一作者:翟振和,博士生,主要从事地球重力场及卫星测高研究。E-mail: zhaizhenhe1980@163.com

响的门的个数; P_i 表示对应门的波形能量; N 表示波形的总采样数。基于以上信息, 回波波形上升缘的位置可由式(4)获得:

$$\text{LEP} = \text{COG} - \frac{W}{2} \quad (4)$$

最后得到相对于正常跟踪点的距离改正值 dr :

$$dr = (\text{LEP} - \text{track}) \cdot dtw \quad (5)$$

式中, track 表示卫星上正常跟踪点的位置; dtw 表示波形门宽的长度。

2 阈值重跟踪算法

阈值重跟踪算法由 Davis 的研究发展而来^[8], 首先计算热噪声 P_N :

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

然后计算阈值水平 T_h :

$$T_h = P_N + q(A - P_N) \quad (7)$$

式中, A 的计算见式(1); P_N 表示前 5 个门的功率平均值; q 表示阈值; 波形上升缘的重跟踪位置 G_r 由邻近 T_h 的值线性内插得到^[10-11]:

$$G_r = G_{k-1} + \frac{T_h - P_{k-1}}{P_k - P_{k-1}} \quad (8)$$

式中, G_{k-1} 表示波形的第 $k-1$ 个门, k 是超过 T_h 值的第一个门的位置编号。阈值等价于对应波形最大振幅的比例系数如 25%、50%、75% 等。本文将结合 Jason-2 数据对阈值的选取进行分析。

3 基于 Brown-Hayne 模型的重跟踪算法

Brown-Hayne 模型的基本形式如下:

$$P(t) = P_{fs}(t)q_s(t)P_{ptr}(t) \quad (9)$$

式中, $P(t)$ 表示回波波形能量; t 表示时间; $P_{fs}(t)$ 表示平坦海面的冲击响应; $q_s(t)$ 是镜像点的海洋面高程概率密度函数; $P_{ptr}(t)$ 表示雷达点目标响应。式(9)是一个卷积表达式, 为了实际应用需要进行简化, 当忽略海面高度倾斜参数影响后, Brown-Hayne 模型可得到如下简化形式^[12]:

$$P(t) = P_N + \frac{1}{2}A_0A_\xi \left[1 + \text{erf}\left(\frac{\tau}{\sqrt{2}}\right) \right] \exp\left[-d\left(\tau + \frac{d}{2}\right)\right] = P_N + \frac{1}{2}A_0 \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi\right) \cdot \left[1 + \text{erf}\left(\frac{\tau}{\sqrt{2}}\right) \right] \exp\left[-d\left(\tau + \frac{d}{2}\right)\right] \quad (10)$$

式中, A_0 表示信号幅度; erf 表示误差函数; P_N 表示热噪声水平; ξ 表示偏天底点角。其中 d 表示如下:

$$d = \left[\frac{4c}{\gamma_a h} \frac{1}{(1+h/R)} \cos(2\xi) - \frac{16}{\gamma_a^2} \left(\frac{c}{h} \frac{1}{(1+h/R)} \right) \sin^2(2\xi) \right] \sigma \quad (11)$$

式中, γ_a 表示天线波束宽度参数; c 表示光速; h 表示卫星相对于参考椭球高度; R 表示地球半径; σ 表示上升时间。通过对该简化模型的参数估计可以获得以下参数: ① t_0 表示对应于平均海水面的时间偏移; ② σ 表示合成上升时间; ③ A_0 表示信号幅度, 与后向散射系数有关; ④ P_N 表示热噪声水平; ⑤ ξ 为偏天底角。

参数估计的方法有极大似然估计(MLE)、迭代最小二乘(ILS)等方法, 本文采用迭代最小二乘法求解 5 个参数。通过参数估计可获得平均海面对应的时延参数 t_0 , 进而得到海面高的改正值。由于关于 5 个参数偏导数的推导和公式占用大量篇幅, 本文将不直接给出这一过程以及具体公式。

4 中国海域的试验与分析

本文计算用的数据采用法国空间局(CNES)发布的 Jason-2 卫星 SGDR 数据, 计算区域分别选择渤海、黄海、东海和南海。其中渤海(北纬 38.2°~38.8°)、黄海区域(北纬 35°~35.6°)采用第 136 周期编号“062”弧段的 Ku 波段 20 Hz 数据进行分析, 该弧段测量数据的地面轨迹见图 1。东海区域(北纬 25°~28°)采用的是第 136 周期编号“240”弧段的 Ku 波段 20 Hz 数据, 其地面轨迹见图 2。南海区域(北纬 15°~19.5°)采用的是第 136 周期编号“114”弧段的 Ku 波段 20 Hz 数据, 其地面轨迹见图 3。

在最小二乘解算中, 分别采用加权与不加权两种形式求解, 加权的准则如下:

$$\begin{cases} P_i = 4, i \leq \text{LEG} - 1 \\ P_i = 2, \text{LEG} - 1 < i \leq \text{LEG} + 2 \\ P_i = 1, \text{LEG} + 2 < i \leq 104 \end{cases} \quad (12)$$

为了与基于 Brown-Hayne 模型的最小二乘估计法进行比较分析, 在 4 个海域同时选用阈值法(分别采用 10%、30%、50% 阈值)、OCOG 算法进行波形重跟踪, 各种算法获得的波形重跟踪结果见图 4~图 7。

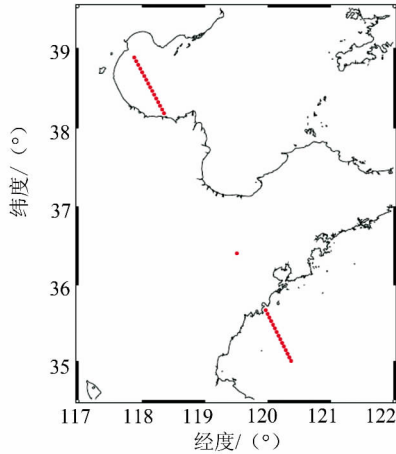


图 1 Jason-2“062”弧段地面轨迹

Fig. 1 Jason-2“062”Pass Ground Track

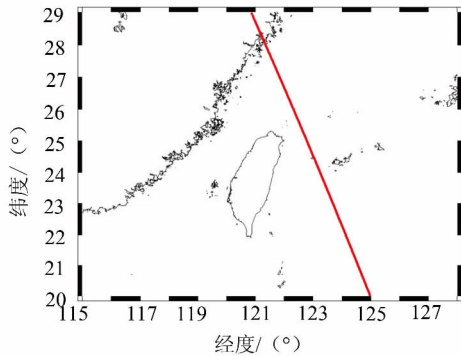


图 2 Jason-2“240”弧段地面轨迹

Fig. 2 Jason-2“240”Pass Ground Track

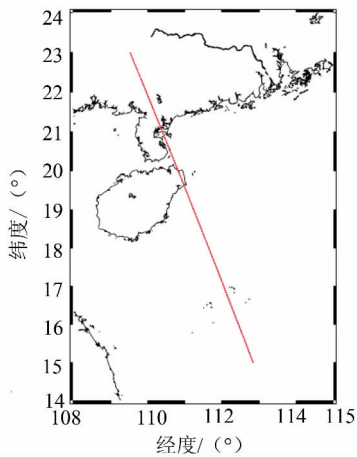


图 3 Jason-2“114”弧段地面轨迹

Fig. 3 Jason-2“114”Pass Ground Track

计算结果表明,加权与不加权结果非常一致,图 4~图 7 表示的即不加权的结果,从图 4~图 7 中可以看出,50%阈值算法与最小二乘算法(迭代 4 次)得到的结果最为接近,而其他算法则表现出较大的差异,为了验证算法的准确性,将 50%阈值算法与最小二乘算法结果与最大似然估计法结

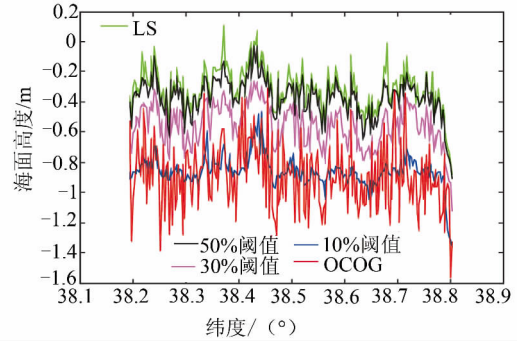


图 4 渤海区域的波形重跟踪结果

Fig. 4 Results of Waveform Retracking in Bohai Area

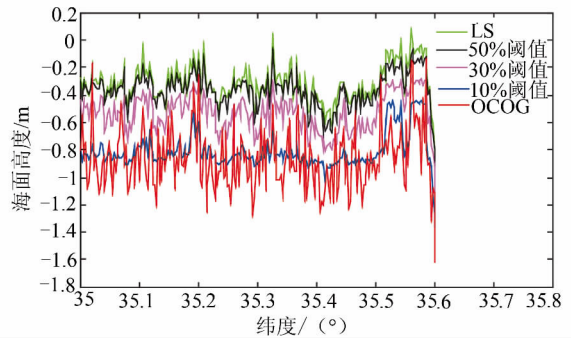


图 5 黄海区域的波形重跟踪结果

Fig. 5 Results of Waveform Retracking in Yellow Sea

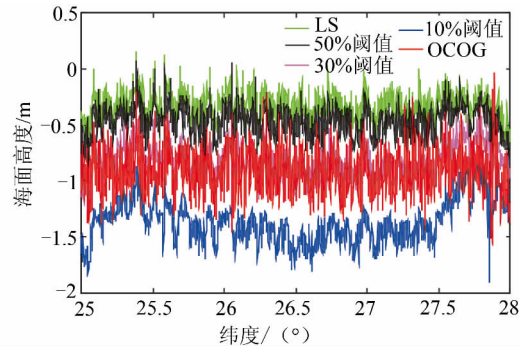


图 6 东海区域的波形重跟踪结果

Fig. 6 Results of Waveform Retracking in East China Area

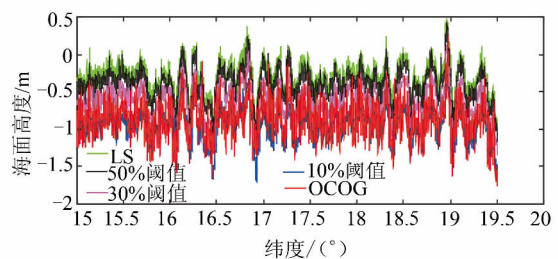


图 7 南海区域的波形重跟踪结果

Fig. 7 Results of Waveform Retracking in South China Area

果(由法国空间局公布)进行比较,见表 1~表 2。

表1 阈值算法(50%阈值)重跟踪结果的精度统计/m
Tab.1 Accuracy Statistics of Threshold Method
(50% Threshold Value)/m

区域	最大差值	最小差值	差值均值	标准偏差
渤海区域	0.21	-0.27	-0.05	0.05
黄海区域	0.12	-0.18	-0.04	0.03
东海区域	0.22	-0.38	-0.10	0.06
南海区域	0.15	-0.31	-0.07	0.04

表2 迭代最小二乘算法重跟踪结果的精度统计/m
Tab.2 Accuracy Statistics of Iterative Least
Square Method/m

区域	最大差值	最小差值	差值均值	标准偏差
渤海区域	0.10	-0.06	0.01	0.02
黄海区域	0.16	-0.16	0.00	0.02
东海区域	0.12	-0.11	0.02	0.03
南海区域	0.14	-0.13	0.01	0.02

表1、表2结果表明在阈值算法中,50%阈值相比较于其他阈值及OCOG算法更优,但存在4~10 cm的偏差。基于Brown-Hayne模型的最小二乘估计法与最大似然估计法(MLE)得到的结果最为一致,比较精度约2 cm左右,考虑到MLE算法本身存在一定的误差,因此,基于Brown-Hayne模型的最小二乘估计法在实用中是准确可行的。在渤海、黄海两个海域,利用Brown-Hayne模型获得的海面高改正量平均在30 cm左右,东海区域改正量略大于渤海、黄海,南海部分海域(如北纬 $16^{\circ}\sim 17^{\circ}$)其改正量超过50 cm,有的甚至达到1 m,经过分析这部分海域正好位于西沙群岛海域。综合4个海域的结果可以看出,越靠近大陆、岛屿,波形重跟踪的改正量越大,这说明在靠近大陆及岛屿区域要获得精确的海面高,波形重跟踪的作用尤为重要。

5 结语

本文对Brown-Hayne模型法、OCOG算法、阈值算法3种波形重跟踪算法进行了研究分析,利用Jason-2卫星的SGDR数据在中国渤海、黄海、东海、南海4个海域开展了波形重跟踪试验,得到以下有益的结论。

1) 在渤海、黄海、东海、南海4个海域,基于Brown-Hayne模型的最小二乘估计法获得的波形重跟踪结果相比较于阈值法、OCOG算法与法国空间局公布的最大似然估计法结果最为一致,经比较精度约2 cm左右。

2) 50%阈值算法获得的波形重跟踪结果相比较于其他阈值精度更优,经比较精度在3~6

cm,但存在4~10 cm的偏差。OCOG算法获得的结果存在较大误差,但其结果作为Brown-Hayne模型的初始值在实践中是可行的。

3) 在4个海域中,当地面轨迹靠近大陆时,海面高改正量会较宽阔海域增大。南海区域的海面高改正量最大,最大可至1 m,其原因可能是卫星地面轨迹经过了西沙群岛,雷达回波波形受到了一定的影响。

4) Brown-Hayne模型是描述传统雷达高度计的基本回波模型,基于该模型的重跟踪算法显然比OCOG法、阈值法两种经验算法更加严密和准确,但Brown-Hayne模型在使用中较为复杂,为了提高计算速度,在精度要求不高的情况下,阈值算法不失为另一种选择。

致谢:感谢中国科学院空间中心的许曦煜、杨双宝在本文撰写中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Bao Lifeng, Lu Yang, Xu Houze. Waveform Retracking Method of Topex/Poseidon Satellite in Shallow Sea[J]. *Chinese J Geophys*, 2004,47(2): 216-221(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)
- [2] Chang Xiaotao, Li Jiancheng, Guo Jinyun. A Multi-Leading Edge and Multi-Threshold Waveform Retracker[J]. *Chinese J Geophys*, 2006,49(6):1 629-1 634(常晓涛,李建成,郭金运,等.一种多前缘多阈值的波形重构算法[J].地球物理学报,2006,49(6):1 629-1 634)
- [3] Yang Le, Lin Minsen, Zhang Youguang, et al. The Research of Waveform Retracking of JASON-1 in Chinese Coastal Area [J]. *Acta Oceanologica sinica*, 2010,32(6):91-101(杨乐,林明森,张有广,等.中国近岸海域高度计JASON-1测量数据的波形重构算法研究[J].海洋学报,2010,32(6):91-101)
- [4] Guo Jinyun, Gao Yonggang, Chang Xiaotao, et al. The Threshold Optimized Algorithm of ENVISAT Waveform Retracking in Coastal Area[J]. *Chinese J Geophys*, 2010,53(4):807-814(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[J].地球物理学报,2010,53(4):807-814)
- [5] Yang Yuande, E Dongchen, Huang Jinwei, et al. Chinese Coastal Gravity Anomalies from Waveform Retracked Geosat/GM Altimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12):1 288-1 290(杨元德,鄂栋臣,黄金维,等.

- Geosat/GM 波形重跟踪反演中国沿海区域重力异常[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12): 1 288-1 290)
- [6] Chu Yonghai, Li Jianchen, Zhang Yan, et al. Analysis and Investigation of Waveform Retracking Data of ENVISAT[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(1): 77-79 (褚永海, 李建成, 张燕, 等. ENVISAT 测波形重跟踪分析研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1): 77-79)
- [7] Guo Jinyun, Chang Xiaotao, Sun Jialong. et al. Waveform Retracking of Satellite Radar Altimeter and Applications[M]. Beijing: Press of Surveying and Mapping, 2013(郭金运, 常晓涛, 孙佳龙, 等. 卫星雷达测高波形重定及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2013)
- [8] Davis C H. A Robust Threshold Retracking Algorithm for Measuring Ice-Sheet Surface Elevation Change from Satellite Radar Altimeter[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35(4): 974-979
- [9] Lee Hyongki, Shum C K, William Emery. Validation of Jason-2 Altimeter by Waveform Retracking over Coastal Ocean [J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33: 304-316
- [10] Hwang C, Guo Jinyun. Coastal Gravity Anomalies from Retracked Geosat Altimetry: Improvement, Limitation and the Role of Airborne Gravity Data [J]. *J Geod*, 2006, 80: 204-216
- [11] Vignudelli S, Kostianoy A, Cipollini P. Coastal Altimetry[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 81-83
- [12] Deng X, Featherstone W E. A Coastal Retracking System for Satellite Radar Altimeter Waveforms: Application to ERS-2 Around Australia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(6): 1-16

Waveform Retracking Analysis of Jason-2 Altimeter Data in the Four Chinese Sea Area

ZHAI Zhenhe¹ SUN Zhongmiao¹

¹ Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Three methods including offset centre of gravity retracker(OCOG), threshold method and Brown-Hayne model are evaluated in this paper. Retracking experiments were conducted for Bohai, Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea areas using Jason-2 20 Hz Sensor geophysical data recorder(SGDR). The results show that the iterative least square method has an accuracy of 2 cm, comparing favorably to the maximum likelihood estimator (MLE) method issued by CNES in the four sea area. A 50% threshold value yields superior performance than other values applied to the China seas area with an accuracy of 3~6 cm and bias of 4~10 cm in contrast to the MLE method. The OCOG method delivers less accurate results but this may be due to the initial value in the Brown-Hayne model. The correction quantity with respect to the normal tracking points increases when close to continents and islands, especially in the South China Sea, as the biggest correction is 1m; radar waveforms are affected when satellite tracks cross the Xisha archipelago.

Key words: waveform retracking; Brown-Hayne model; OCOG method; threshold method

First author: ZHAI Zhenhe, PhD, specializes in earth gravity field and satellite altimetry. E-mail: zhaizhenhe1980@163.com

Foundation support: The China High Resolution Earth Observation System (CHEOS) Youth Innovation Found, No. GFZX04060103-7-14; the National Natural Science Foundation of China, No. 41174017.