

神舟四号高度计波形数据预处理和信息提取*

纪永刚¹ 张杰¹ 张有广² 孟俊敏¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

提要 神舟四号(SZ-4)高度计在国内首次提供了星载雷达高度计回波波形数据。本文中作者分析了 SZ-4 高度计回波波形的特点,完成波形数据的预处理,并在此基础上完成初步的信息提取。在数据预处理方面,通过 SZ-4 高度计水陆边界处波形的特点,提出了波形最大幅度控制的方法,筛选回波波形。在波形归一化处理过程中,发现 SZ-4 高度计波形中存在双峰现象,并指出第二个峰为异常波形区。在波形信息提取方面,利用波形重新跟踪得到的半功率点计算出 SZ-4 高度计高度跟踪补偿误差,并根据高度计天线指向角和回波波形下降沿斜率之间的关系,从波形后沿提取天线指向角信息。分析结果表明, SZ-4 高度计天线指向比较平稳,而跟踪补偿由于变化较大,在计算海面高度时,应作为一项误差源被考虑到。

关键词 神舟四号高度计,回波波形,波形重跟踪,高度跟踪补偿,指向角

中图分类号 TP753

国外雷达高度计卫星从最早的 Skylab 开始,已经发射了 GEOS-3、Seasat、Geosat、ERS-1/2、TOPEX/Poseidon,一直到最新的 GFO、Jason-1、Envisat、ICESat 等多颗高度计卫星; Cryosat、Jason-2 等已在计划发射阶段。2002 年 12 月 30 日凌晨发射的“神舟四号”(SZ-4)飞船是中国发射的第四艘无人飞船,其主要载荷是多模态微波遥感器,其中高度模态(高度计)是多模态微波遥感器中的一个主要模态。在近 5 个月的时间内, SZ-4 高度计在留轨期间的五次对地观测内获取了大量的航天雷达高度计回波数据。利用获取的大量波形数据,加上 GPS 定轨信息,可提取海面高度、有效波高和海面风速等基本物理量,并通过提取物理量的分析和处理,开展大地测量学、地球物理学和海洋动力学的研究(王广运等, 1995; Fu *et al.*, 2001)。

与国外已业务化运行的卫星高度计不同, SZ-4 高度计为一试验系统,需要根据其波形数据来提取有效波高、海面高度、海面风速等信息,并通过与实测数据的比对来验证其功能体制。而 SZ-4 高度计波形数据的预处理是波形数据信息

提取前的数据处理阶段,此过程必不可少,其数据处理质量的好坏,直接影响到后续信息提取的效果。国外业务化运行的卫星高度计的波形数据预处理甚至一些波形信息的提取,如有效波高的信息提取,都是在卫星上完成的。而 SZ-4 高度计波形数据的预处理需要在数据下载到地面后进行,其主要过程包括数据的质量控制、多波形平均、波形归一化等处理过程。同时,一些基本的波形信息是在波形预处理过程中完成的,如高度跟踪补偿和高度计天线指向角,都是在波形分析的基础上提取得到的。

1 SZ-4 数据预处理

1.1 数据质量控制

当高度计足印靠近陆地或位于浅水海区时,陆地散射表面的不规则性及散射特性的多变性,会造成地表倾角变化的不连续,对处于陆地跟踪模式的高度计,将造成高度偏差信号的很大误差,从而导致跟踪环失锁。由于雷达回波信号的幅度过强,波动起伏过大,使得高度计总是处于锁定—失锁—再锁定的不稳定状态。此时具有较大脉冲幅度的回波波形已明显不同于足印位于深水

*国家高技术研究发展计划项目(遥感应用模块检测与验证技术研究), 2005AA604150 号。纪永刚, 博士, E-mail: jiyonggang@gmail.com

收稿日期: 2006-01-04, 收修改稿日期: 2007-12-06

海区中的标准回波波形, 波形变得异常(Hayne, 1980; Chelton *et al*, 1989)。图 1 为 SZ-4 高度计足印靠近陆地的一个海面回波波形, 其中两实线之间的区域对应真实的海面回波区域, 而第二条实线之后的波形区对应陆地影响的区域。如果此时将波形起始点到最大峰值处之间的波形作为回波上升沿处理, 则会高估高度计脉冲从开始接触海面到形成最大照明区的时间间隔, 在一定程度上高估了海面的有效波高; 同时, 由于估测的回波前沿半功率点的位置(图 1 中对应虚线处)比真实的海面回波半功率点的位置推后, 也会高估卫星到海面之间的距离, 进而低估了海平面高度(Bernard *et al*, 1983)。

已发射且业务化运行的卫星高度计, 如 TOPEX/Poseidon 高度计数据中, 除提供区分陆地和海洋的标记位外, 还提供了区分深水、浅水、陆地甚至是海冰的标记位, 而 SZ-4 高度计数据中只提供了一个区分陆地和海洋的水陆标记位。从已有的波形数据中选取有用的波形数据, 剔除异常波形, 有必要对靠近陆地的波形数据做详细分析。

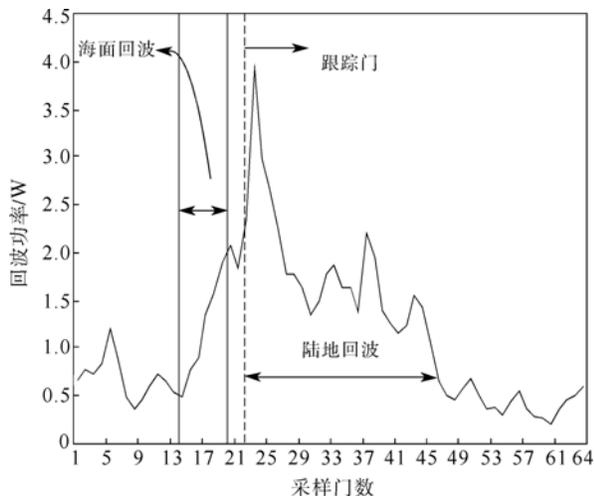


图 1 靠近陆地的高度计回波波形
Fig.1 Altimeter waveform near continent

图 2 为 SZ-4 飞船 2003 年 2 月 8 日由西北向东南方向经过日本本州岛的波形的地面轨迹, 图中圆圈内为根据数据水陆标记剔除了陆地波形的飞船地面轨迹, 对应图 3 中的 j—m 之间的波形。可以看出, 图 3 中的 20 个波形清楚地反映出飞船由海洋经过陆地, 然后再由陆地回到海洋的过程, 可简单地用图 4 中的过程表示。高度计星下点足印位于海洋中, 且距离陆地较远时, 波形主

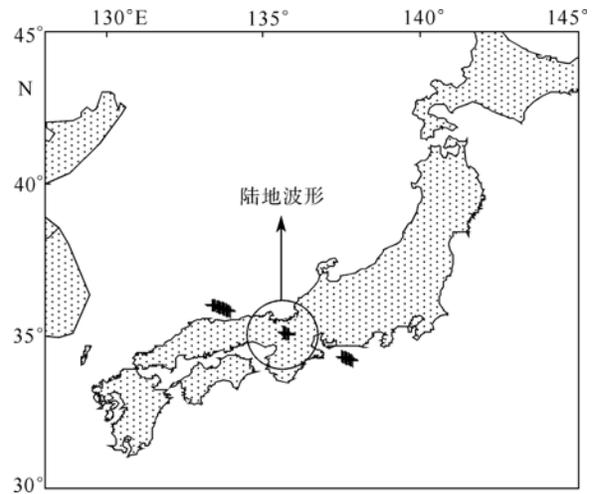


图 2 带有陆地标识位的波形地面轨迹分布
Fig.2 Ground tracks with waveform on land

要受海面的影响, 反映了海面信号特征。随着高度计足印接近陆地, 星下点接近海岸线, 高度计足印内陆地散射的能量开始在波形中反映出来, 如波形 c 中, 大约从第 52 个采样门开始出现陆地的影响。在这种情况下, 由于波浪的存在, 高度计到星下点海面的距离小于高度计到非星下点陆地的距离, 因此海面的返回脉冲在波形中出现的早, 对应前端的波形。随着高度计轨迹向陆地方向移动, 地面在波形中的影响逐渐增大, 且影响位置不断向前面的采样门方向推进, 如在波形 d 的位置为第 41 门, 波形 f 中在第 34 门, 直到波形 g 的时候, 已经到了第 21 门的位置, 此时波形主要是受陆地影响, 海面的影响已很弱。从波形 h 开始, 持续到波形 p 为陆地的波形, 由于地面高度的变化剧烈, 导致了波形的变化很大, 较为杂乱, 且波形主要以尖脉冲为主。

在飞船从陆地到海洋的过程中, 由于高度计足印逐渐移出陆地, 陆地在波形中的影响也逐渐减小, 其在波形中的影响位置与高度计从海洋往陆地转移过程中的趋势相反, 影响位置不断由前向后退移, 直到高度计足印内没有陆地的影响, 直至消失, 此后的回波波形完全来自于海面的影响。对于这部分的波形处理, 如只是简单地将带有陆地标记位的数据剔除, 则一些异常波形会保留下来, 包括从海洋到陆地与从陆地到海洋过程中陆地影响的波形, 也包括一部分剩余的大幅度尖脉冲的足印位于陆地上的异常波形(如波形 i 和波形 n)。

由上述分析可以得出, 简单地通过剔除带有

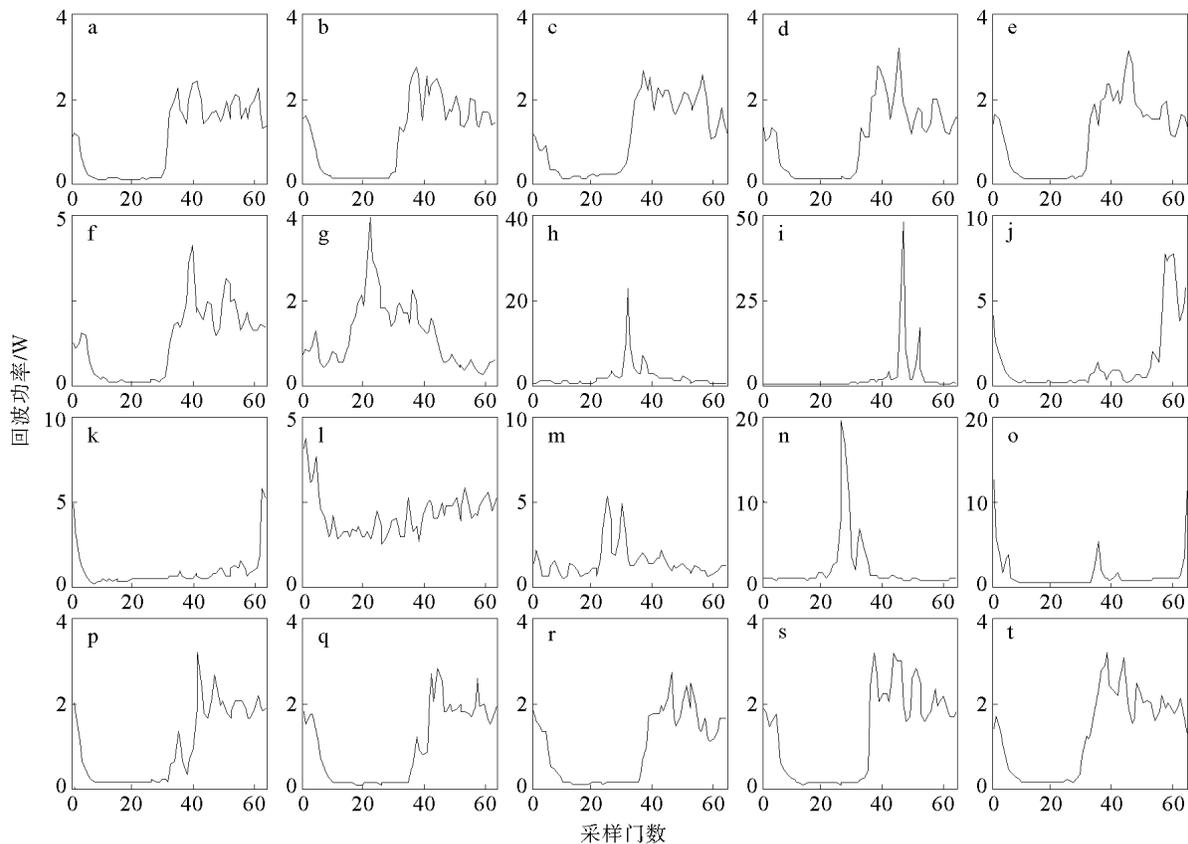


图3 所有地面轨迹的高度计回波波形

Fig.3 Altimeter waveforms of all ground tracks

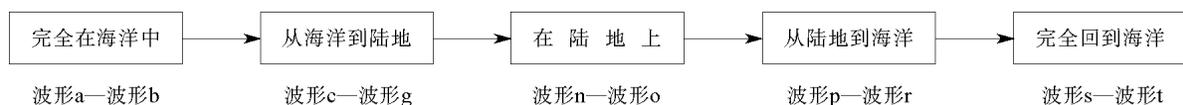


图4 经过陆地的波形过程图

Fig.4 The waveforms during land passing

陆地标识位的波形数据, 必然还会保留浅水海域或者陆地影响的部分异常波形, 因此仅仅根据波形数据中提供的水陆标记位剔除异常波形是不够的。很明显的是, 保留下来的异常波形, 特别是受陆地影响较大的波形都是幅度较大的尖脉冲(如图3的波形i)。在图5中, 作者做出了较大幅度尖脉冲异常波形的的位置统计分布, 其中异常波形处用实心圆表示。从图5可以看出, 出现的异常波形很大一部分集中在靠近陆地或岛屿附近, 其主要波形形状为图6中波形a。但出现在 $103.89^{\circ}\text{E}-14.5^{\circ}\text{S}$ 处的一条数量较大的异常波形带, 波形主要为双尖峰波形, 见图6波形b。这部分异常波形带出现的位置并不是在陆地或岛屿附近浅水区, 且数量很大, 其原因可能与当时的飞船运行状态、高度计仪器跟踪状态或仪器的增益不稳定有关。因此根据异常波形具有较大幅度的

特点, 作者除利用陆地标志位剔除部分异常波形外, 还可以简单地利用限制波形脉冲幅度的方法对波形做进一步筛选。通过这种限制波形最大脉冲幅度的方法, 剔除2.3%数量的异常波形(以2月8日的SZ-4高度计数据为例)。利用限制脉冲幅度的方法进行筛选是较为简单的方法, 进一步的波形筛选可以结合具体的波形分析和处理方式对波形数据加以控制。

1.2 波形处理

1.2.1 波形一秒平均 为减小波形中的随机噪声及其他系统误差的影响, 需要对多个波形进行平均, 常用的一秒平均(Hayne, 1980), 即20个波形(50ms平均)对应采样门值的平均。一秒平均的过程本身就是对波形数据进行筛选的过程, 因此需要按照前面提出的水陆交界处波形的质量控制条件, 对每一个参与一秒平均的波形进行筛

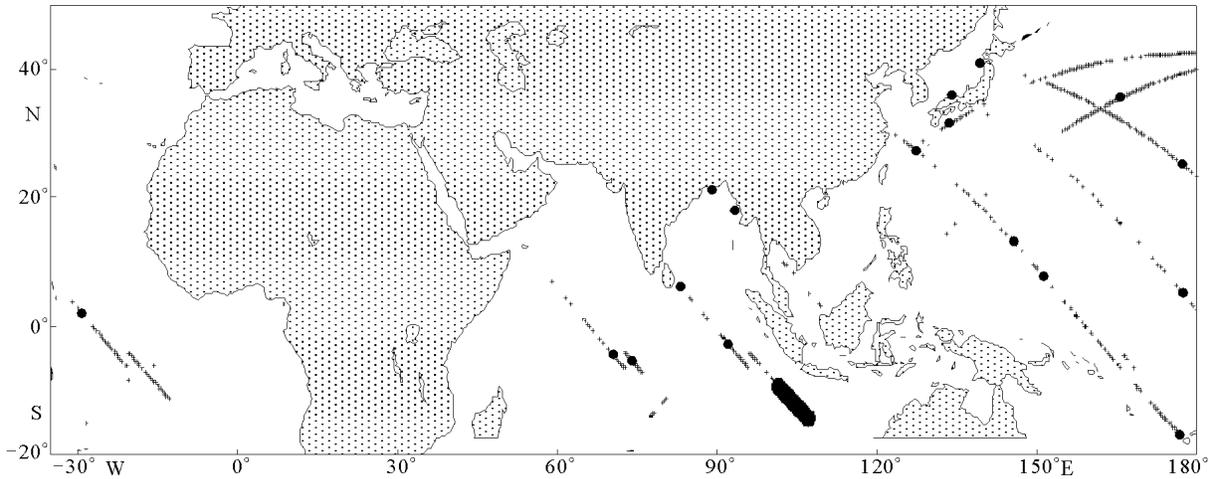


图5 异常波形分布

Fig.5 Distribution of abnormal waveforms

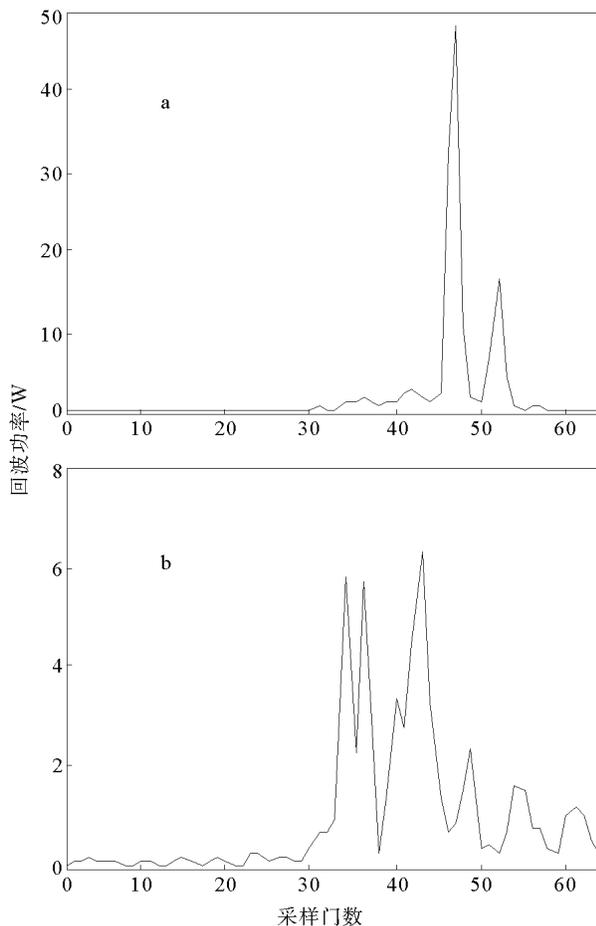


图6 异常波形

Fig.6 Abnormal waveforms

选,即每次选取20个原始波形数据,首先剔除其中带有陆地标记位的数据,然后利用限制波形脉冲幅度的方法剔除异常波形,最后计算剩余的波形对应采样门值的平均值。

1.2.2 波形热噪声消除 图7a为参与一秒平均的一个原始波形,图7b是20个波形平均之后的波形。从图7b可以看出,平均后的回波波形主要有四部分组成:跟踪器精距离调整区(第1和12个采样门之间)、较为平坦的热噪声区(13和19个采样门之间)、波形前沿上升区(21个采样门和第37个采样门之间)和波形后沿衰减区。其中,热噪声对整个波形产生影响,需求出平均热噪声分量,然后将其从波形对应采样门值中减去,以消除其影响。对SZ-4高度计波形,热噪声分量可通过求波形上升沿以前连续且稳定的5个采样门值的平均来估计:

$$P_{\text{thermal}} = \frac{1}{5} \sum_{i=k}^{k+4} FFT(i), \quad 0 \leq i \leq 64 \quad (1)$$

其中, $FFT(i)$ 为第 i 个波形采样门值, k 是波形中第一个出现稳定采样门的位置。由于波形前沿存在跟踪器精距离调整区,文中选取第13个采样门到波形前沿起始点之间的相对平坦的区域作为热噪声区,热噪声消除处理见公式(2),处理后结果见图7c。

$$\begin{cases} FFT(i) = FFT(i) - P_{\text{thermal}}, & 13 \leq i \leq 64 \\ FFT(i) = 0, & 1 \leq i \leq 13 \end{cases} \quad (2)$$

1.2.3 波形归一化 波形归一化处理,即

$$FFT(i) = \frac{FFT(i)}{\max FFT}, \quad 1 \leq i \leq 64 \quad (3)$$

其中, $\max FFT$ 为去噪波形前沿的最大采样门值,满足 $\max FFT = \max [FFT(i)]$ 。

归一化过程中,需要通过回波形状、回波幅度的分析,找出波形最大值。通过对大量回波

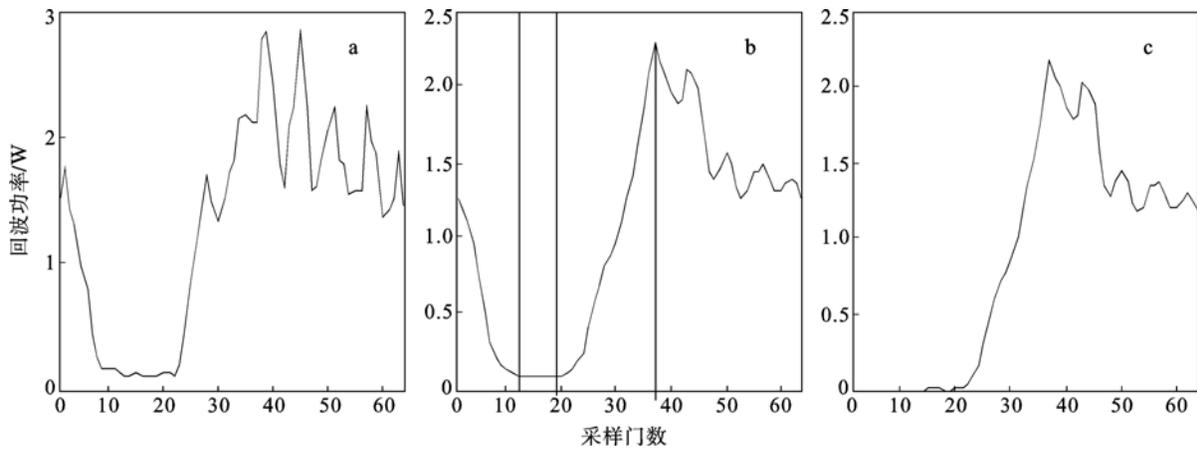


图7 1秒平均前的原始波形(a)、1秒平均的波形(b)、去噪后的波形(c)

Fig.7 Original waveform before one-second average process (a); one-second averaged waveform (b); Waveform clear of thermal noise (c)

波形的统计分析发现, 原始 50ms 波形(图 7a) 和一秒平均后的波形(图 7b), 都存在明显的两个波峰, 且两峰值低谷的位置基本在固定的位置, 大约在第 41 个采样门处。图 8 给出具有典型双峰波形。从这几个波形中可以看出, 从波形前沿起始处到第一个高峰之间的波形真实地反映了波形平缓上升的趋势, 对应高度计星下点照明区面积连续增大的过程。而第二个峰值在波形后沿衰减区出现的较大幅值, 属于波形异常区, 就其形成原因可能是由于在量化器中存在直流偏压以及其他未知信号的影响造成的(Deng *et al*, 2001), 此异常信号在波形的影响范围主要集中在第二峰值周围的 5 个采样门。经过上述分析, 文中选取第一个峰值为最大峰值进行归一化操作。找到波形最大峰值之后, 代入公式(3), 完成波形的归一化处理。归一化后的波形见图 9。

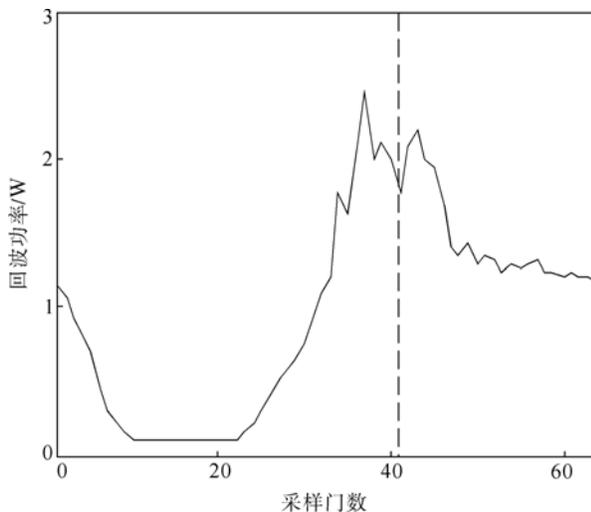


图8 神舟四号高度计双峰波形

Fig.8 The altimeter waveform with two peaks

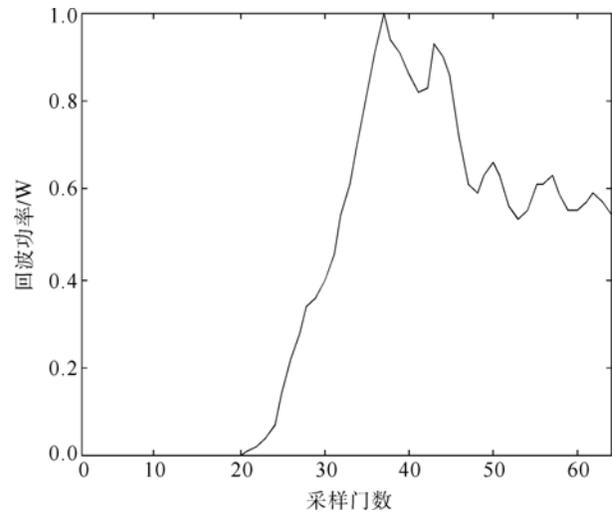


图9 归一化波形

Fig.9 Normalized waveform

2 高度计波形信息提取

2.1 高度跟踪补偿

从高度计得到的海面高度, 并不对应真实的海平面, 而是有一定的偏差。为了补偿由于波形半功率点与跟踪门之间的偏差而引起的海面高度偏差, 即跟踪补偿误差, 需要重新跟踪波形。半功率点位置通过在波形中临近阈值交叉门的线性插值确定(Michael *et al*, 1999):

$$t_0 = (n-1) + \frac{TL - FFT(n-1)}{FFT(n) - FFT(n-1)} \quad (4)$$

其中, TL 为阈限值, n 是在归一化波形中第一个超过阈值的采样门的位置。根据得到的半功率点 t_0 , 求出跟踪补偿量 dr (单位 m)(Michael *et al*, 1999):

$$dr = ts \frac{c}{2} \times (t_0 - t_r) \quad (5)$$

其中, t_s 为脉冲宽度(SZ-4 高度计的脉冲宽度为 3ns), c 为光速, t_r 为高度计跟踪门位置。代入 c 和 t_s 后, 公式(7)可进一步得:

$$dr = 0.4497 \times (t_0 - t_r) \quad (6)$$

根据上述公式, 计算得到了 2 月 8 日 SZ-4 高度计数据的跟踪补偿的时间序列分布, 见图 10。

2.2 SZ-4 高度计天线指向角估计

由于高度计天线指向角 ξ 的平方和回波波形下降沿斜率 B 之间存在如下的关系式(Batoulas *et al.*, 1999):

$$\xi^2 = \frac{B/\alpha + 1}{2 + \frac{4}{\gamma}}$$

其中, $\alpha = \frac{4c}{\gamma H \left(1 + \frac{H}{R}\right)}$, $\gamma = 0.725 \sin^2 \theta$, c 为光速, H 为卫星高度, θ 为天线孔径, R 为地球半径。

可以看出, 指向角的平方 ξ^2 除了主要取决于波形下降沿的斜率外, 还与卫星高度、天线孔径有关。波形后沿的衰减反映天线指向, 对测量卫星到海面之间的距离产生很大的影响, 可以通过波形拟合的方法得到回波波形下降沿的斜率 B , 然后求出飞船指向角, 详细过程见参考文献(张有广等, 2007)。

对于波形下降沿的拟合通常采用分段拟合, 而不是对整个下降沿的波形进行拟合, 分段的方法对于每个高度计都不尽相同。对于 SZ-4 高度计来说, 考虑到双峰现象中第二个波峰(41 采样门位置)的影响, 这里是选取 44—60 采样门之间的一段波形进行拟合。图 11 中列出了 2003 年 2 月 8 日波形数据得到的天线指向角的分布图。结果表明, 利用回波波形后沿拟合得到的 SZ-4 高度计天线指向角在计算时间内比较平稳, 大部分在

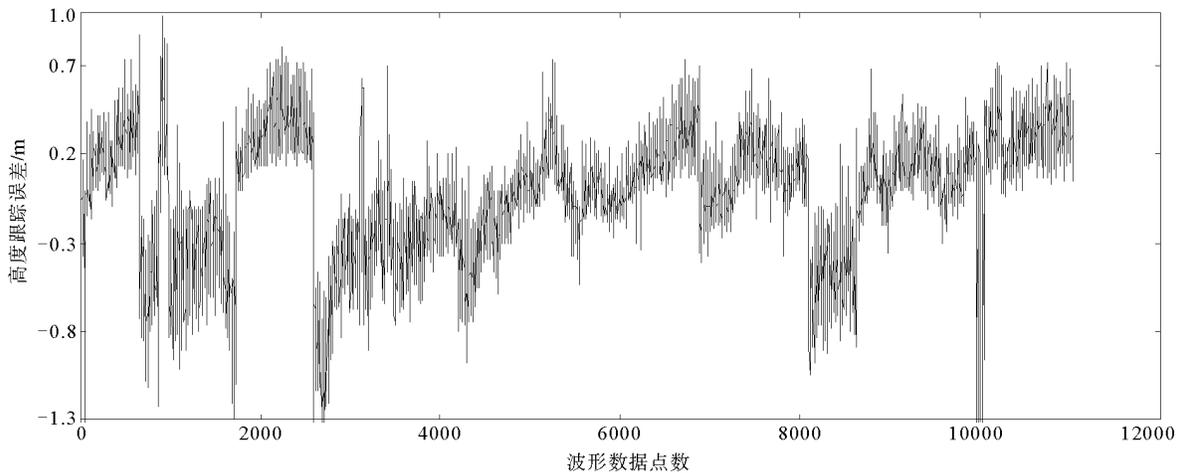


图 10 高度跟踪补偿量的分布

Fig.10 Distribution of range retracking correction

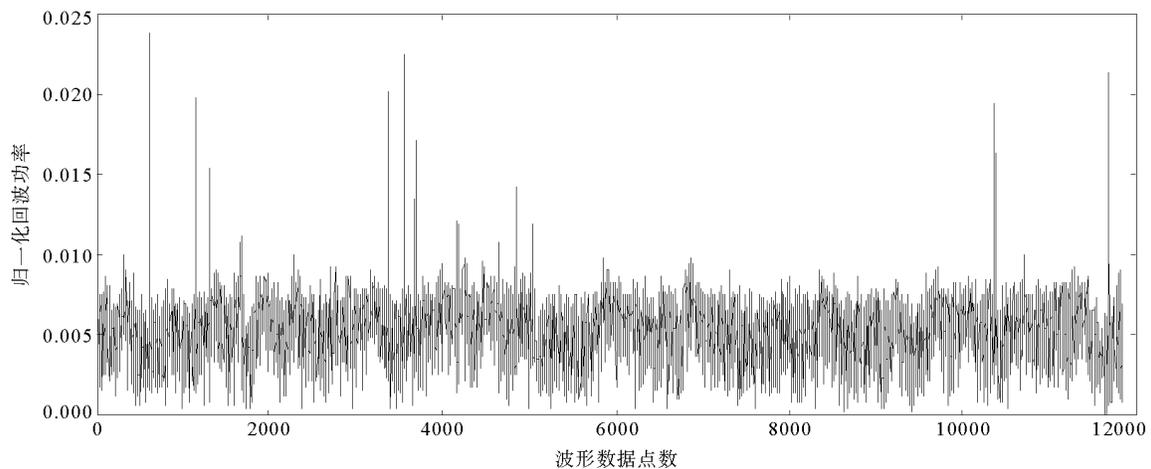


图 11 高度计天线指向角分布

Fig.11 Distribution of altimeter antenna pointing angle

0.01°以内变化,变化不大,说明SZ-4高度计运行指向较为稳定。

3 结论与讨论

通过对SZ-4高度计波形的分析和处理,做SZ-4高度计波形的预处理与初步的信息提取,得出如下主要结论:

(1) SZ-4高度计异常波形以较大幅度脉冲出现,可通过限制其最大脉冲幅度的方法加以剔除。

(2) SZ-4高度计波形中存在双峰现象,其中第二个波峰为中心的波形区域为波形异常区。

(3) SZ-4高度计的跟踪补偿误差较大,是计算海面高度中的一个较大误差源。

(4) SZ-4高度计天线指向比较平稳。

此外,作者利用限制脉冲最大幅度的方法来筛选回波波形,进一步的异常波形剔除可结合具体的波形分析和处理加以控制,如进行有效波高反演时,通过控制前沿上升沿斜率等方式来做波形数据的进一步筛选。同时,在利用波形进行信息提取的过程中,应注意回波波形中出现的双峰现象,尽量减少其影响。

参 考 文 献

王广运,王海瑛,许国昌等,1995. 卫星测高原理. 北京: 科学出版社, 25—31
张有广, 林明森, 2007. “SZ-4”飞船高度计天线指向角反

演方法. 海洋学报, 29(3): 47—50

- Bernard J, Barlier F, Bethoux J P *et al*, 1983. First Seasat Altimeter Data Analysis on the Western Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 88(C3): 1581—1588
- Batoulas S, Ouan-Zan Zanife, 1999. ERS-2 radar altimeter off pointing impact study: Task1-Impact of the Mispointing on the Altimeters Measurements by Simulation. 195: 4—9
- Chelton D B, Walsh E J, MacArthur J L, 1989. Pulse Compression and Sea Level Tracking in Satellite Altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(3): 407—438
- Deng X, Featherstone W, Berry P *et al*, 2001. Retracking ERS-2 Radar altimetry waveform data in Australia's coastal zone. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2—7
- Ernesto R, Jan M, 1994. Martin. Assessment of the Topex altimeter performance using waveform retracking. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12): 24957—24969
- Fu L L, Anny Cazenave, 2001. *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. San Diego: Academic Press, 2—15
- Hayne G S, 1980. Radar altimeter mean return waveform from near-normal-incidence Ocean surface scattering. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 28(5): 687—692
- Michael A, Shum C K, Renstch M *et al*, 1999. *Coastal altimetry and applications*. Ohio Columbus: Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science of the Ohio State University, Report No. 464: 4—14
- Thomas V, MARTIN H J, ZWALLY A *et al*, 1983. Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms. *Journal of Geophysical Research*, 88(C3): 1608—1616

THE PRETREATMENT AND INFORMATION RETRIEVAL OF WAVEFORM DATA OF CHINESE SPACECRAFT SHENZHOU-4 BORNE ALTIMETER

JI Yong-Gang¹, ZHANG Jie¹, ZHANG You-Guang², MENG Jun-Min¹

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266061*; 2. *National Satellite Ocean Application Service, Beijing, 100081*)

Abstract The space borne altimeter flown on Chinese spacecraft Shenzhou-4 has provided waveform data for the first time in China. The data pre-process is necessary before the waveform data are used to retrieve parameters, such as wind speed and significant wave height. First, the waveforms near land-ocean borders were analyzed to eliminate abnormal waveforms. Second, the waveforms were averaged to remove thermal noise. Finally, normalized waveforms were obtained for further application. After re-tracking the waveforms, the range retracking correction and the altimeter antenna pointing angle were calculated. The results show that the most abnormal waveforms could be cleared by limiting the maximum amplitude. In normal waveforms, double peaks were found, of which the second one is abnormal. Meanwhile, the antenna pointing angle is relatively stable while the range retracking correction varies considerably so that it should be considered as an error source when extracting the sea surface height.

Key words Shenzhou-4 spaceborne altimeter, Echo waveform, Waveform retracking, Range retracking correction, Antenna pointing angle