

基于 HY-2 卫星高度计机载校飞数据的有效波高信息提取及初步分析*

李秀仲¹, 张有广², 孟俊敏¹

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

摘 要: 利用 HY-2 卫星雷达高度计校飞数据, 开展了有效波高信息提取及精度比对研究。首先对其进行波形筛选、1 s 平均和去噪, 然后基于 Hayne 海面回波模型进行波形拟合, 提取出波高均方根并得到有效波高, 并与浮标和同轨迹的 Jason-1 卫星高度计有效波高进行了比较。结果表明, 本次校飞其高度计测波精度存在系统偏差, 初步分析可能是其数据未经仪器校正等原因导致。

关键词: HY-2 高度计; 有效波高; 回波模型

中图分类号: P731.22; P228.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2012)02-0212-07

在过去的 30 多 a 中, 海洋观测卫星在数量上和种类上都有了很大的发展。雷达高度计作为有效载荷搭载在多颗卫星上, 国外雷达高度计卫星从最早的 Skylab 开始, 已经发射了 Geo-3, Seasat, Geosat, ERS-1/2, TOPEX/POSEIDON, GFO, Jason-1, Envisat, ICESat 以及最新的 Jason-2, Cryosat-2 等多颗高度计卫星^[1], 高度计数据广泛应用于海洋学研究。

海面高度、有效波高和海面风速是卫星高度计观测的 3 个基本参数。海面高度是最主要的观测要素, 有效波高和海面风速是附加产品。高精度海面高度要经过大约 1 个月时间才能得到, 而有效波高却可以快速获取, 并且有效波高和高度计天线姿态角相耦合共同影响海面高度的测量^[2]。此外, 有效波高可以进行海洋动力和海气相互作用的研究, 并为天气预报和海洋监测服务, 还可以同化到海浪数值模式中, 使海浪数值预报使用真实的海浪初始场成为可能。

有效波高是所统计的海面前 1/3 个大波波高的平均值, 该值取决于高度计的回波波形前沿斜率。不同的高度计卫星有效波高信息提取方法不一样。Geosat 和 T/P 都是先通过不同的门组合获取与波形前沿斜率有关的参数, 然后通过不同理论回波模型, 制作表格, 查表提取有效波高, 只是 Geosat 在星上, 而 T/P^[3]则是在地面上进行的。T/P 的后续卫星 Jason-1 也是在地面上提取有效波高的, 首先对 1 s 的波形数据进行波形筛选, 然后对 1 s 有效波形平均, 通过波形噪声区得到噪声大小并对平均后的波形去噪, 最后利用理论回波模型进行波形拟合, 提取相关参数得到有效波高。

不同的卫星高度计根据自身的实际情况以及设计要求分别采用了不同的回波模型来提取有效波高。主要卫星高度计使用的回波模型表 1 所示。由于所有模型中点目标响应 $s_r(t)$ 均不是实测的, 所以得到的有效波高均应该根据不同仪器信噪比等因素进行有效波高仪器校正。

HY-2 卫星高度计预计 2011 年发射, 为了检验其测波能力, 有关单位组织开展了 HY-2 高度计航空校飞实验。本研究利用 HY-2 高度计校飞数据, 进行了有效波高信息提取及精度比对工作。对校飞波形数据处理时, 基于 Jason-1 所用模型, 提取出波高均方根并得到有效波高。由于和高度计仪器因素有关的实测点目标响应并未得到, 因此本研究并没有对所得有效波高进行仪器校正。高度计卫星所用模型由 3 个卷积项

* 收稿日期: 2011-03-21

资助项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目——自主海洋动力环境卫星高度计海洋参数反演技术(201105032-1)

作者简介: 李秀仲(1985-), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要从事高度计数据处理方面研究. E-mail: qdlixiuzhong@163.com

(张 骞 编辑)

得来,即 $W(t)=P_{FS}(t) \cdot q(t) \cdot s_r(t)$ 。

表 1 国外主要卫星雷达高度计使用的回波模型

Table 1 Echo models used for the main foreign altimeters

卫星名称	发射时间/年份	$P_{FS}(t)$	$q_s(t)$	$s_r(t)$
TOPEX/POSEIDON	1992	Hayne 模型考虑地球曲率	含斜度	sinc^2 函数
JASON-1	2001	Hayne 模型考虑地球曲率	含斜度	高斯函数
ERS-1/ERS-2	1991/1995	Hayne 模型	无斜度	高斯函数
ENVISAT	2002	Hayne 模型考虑地球曲率	含斜度	高斯函数

1 数据介绍

HY-2 高度计工作指标:工作频率是 Ku 波段的 13.58 GHz 和 C 波段的 5.25 GHz;线性调频信号带宽是 320/80/20 MHz(Ku 波段)和 320/160 MHz(C 波段),当工作在 320 MHz 时,其波形的时间分辨率是 3.125 ns,每个波形有 128 个采样点,每秒获取 20 个波形。

本研究所用 Jason-1 波形(Ku 波段和 C 波段一致):每秒 20 个波形,每个波形采样点 104 个,线性调频信号带宽 320 MHz,波形时间分辨率 3.125 ns。

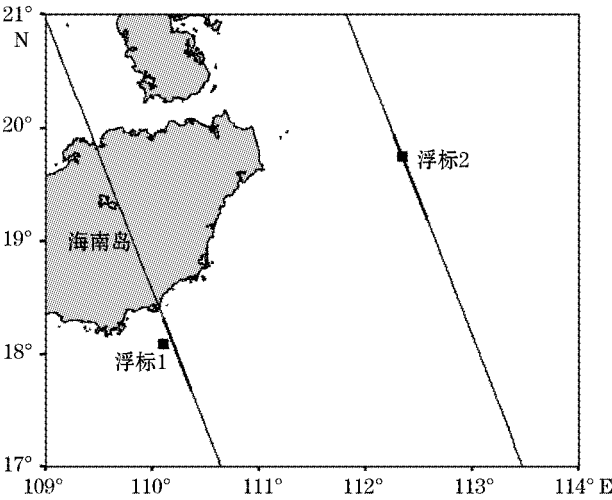


图 1 2009-12-09,12-19 和 12-22 飞行路线

Fig. 1 The flight tracks on the days of December 9, 19 and 22 in 2009

HY-2 卫星雷达高度计校飞自 2009-12-06 开始至 12-22 结束,历时 17 d 共进行了 5 个架次的飞行,区域为海南岛以东海域 17°00'~20°00'N,110°00'~112°00'E。飞机飞行线路依据同步的 Jason-1 卫星轨道制订,飞行高度 5 000~8 000 m。第一架次安排在 12-06,该架次属于检飞性质,主要进行高度计、校正辐射计和惯导的调试,兼顾海洋的观测。通过第一架次的飞行,确认各仪器设备工作正常后,于 2009-12-09,12-16,12-19 和 12-22 进行了 4 个架次的飞行,其中,除 16 日外其它 3 天均为卫星同步。与 12-09 和 12-19 同步的 Jason-1 轨道为 cycle292 pass114 和 cycle293 pass114,图 1 中左边黑色线所示,加粗线为飞机飞行路线,两日各有 14 个足印点和相匹配;与 22 日同步的 Jason-1 轨道为 cycle293 pass190,图 1 中右边黑色线所示,加粗线为飞机飞行路线,该日有 16 个足印点相匹配。12-09 浮标 1 位置(18°05'21.48"N,110°06'8.28"E),距校飞轨迹最近距离小于 8 km。12-22 浮标 2 位置(19°45'15.12"N,112°20'20.04"E),距校飞轨迹最近距离小于 700 m。浮标测波数据为每 0.5 h 一次。

2 有效波高提取

2.1 有效波高提取流程

有效波高提取是针对高度计回波波形的处理,由于高度计接受到的回波信号掺杂噪声及高度计本身天线指向并非严格垂直地面等因素,其流程见图 2。

该流程图中,天线姿态角计算方法参考文献[5]。有效波高信息提取中关键为波形拟合提取参数,将在 2.3 中介绍。

2.2 回波模型

表 1 中给出了国外主要高度计有效波高提取过程中所用到的模型,而本研究采用的 Hayne 模型为

$$W(t) = \frac{P_u}{2} \exp \left[-\alpha \left(\Gamma + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \left\{ \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Gamma}{\sqrt{2}} \right) \right] \left[1 + \frac{\lambda_s}{6} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_c} \right)^3 \alpha^3 \right] - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{\Gamma^2}{2} \right) \frac{\lambda_s}{6} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_c} \right)^3 (\Gamma^2 + 3\alpha\Gamma + 3\alpha^2 - 1) \right\} \quad (1)$$

其中:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{t - t_0}{\sigma_c} - \alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \left(\delta - \frac{\beta^2}{4} \right) \sigma_c \quad (4)$$

$$\delta = \frac{4}{\gamma} \cdot \frac{c}{h} \cdot \frac{1}{1+h/R} \cdot \cos(2\xi) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{4}{\gamma} \cdot \left(\frac{c}{h} \cdot \frac{1}{1+h/R} \right)^{1/2} \sin(2\xi) \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{2}{\ln 2} \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta_w}{2} \right) \quad (7)$$

将模型简写为只由待估计的 4 个参数表示的形式:

$$W = f(t_0, P_u, \sigma_c, \xi) \quad (8)$$

式中, t_0 为跟踪点,用于计算平台到海面的高度; P_u 为回波振幅; σ_c 为回波上升时间,用于计算有效波高; ξ 为天线姿态角; λ_s 为斜度参数; $\sigma_s^2 = \sigma_c^2 - \sigma_p^2$, σ_p 为点目标响应的 3 dB 宽度; h 为卫星到地面的平均高度,此处为校飞飞机飞行高度,约为 7 000 m; R 为地球平均半径,为 6 371 km; c 为光速; θ_w 为天线 3 dB 波束宽度, HY-2 校飞时该值约为 16° ; $\alpha, \Gamma, \beta, \gamma$ 均为中间变量。

2.3 波形拟合

已知实测波形 ($i, FFT(i)$) 和模型,为了得到改变量 $dx_i(t_0, \sigma_c, P_u)$ 的线性估计,使实测波形和回波模型之间的误差 χ^2 最小,可采用最小二乘的方法^[6],即使 $\chi^2 = \sum_i (dy_i)^2 = \sum_i \left[\frac{FFT(i) - W(i, x_{i,n})}{weight_i} \right]^2$ 最小。

第 1 步:对未知参数 (t_0, σ_c, P_u) 求偏导,得 $\frac{\partial W(t)}{\partial t_0}, \frac{\partial W(t)}{\partial \sigma_c}, \frac{\partial W(t)}{\partial P_u}$ 。

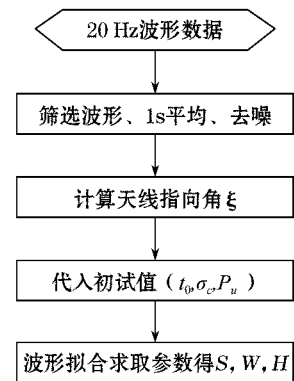


图 2 有效波高提取流程图

Fig. 2 A flow chart for the extraction of the significant wave height

第 2 步:由于 $dy_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial W}{\partial x_j} dx_j |_{i, x_{j,n}}$, 即 $dY = EdX$, 可解得 $dX = (E^T E)^{-1} E^T dY$, 其中 $x_1 = t_0, x_2 = \sigma_c$,

$$x_3 = P_u, E_{i,j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W(t)}{\partial t_0} |_{1, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial \sigma_c} |_{1, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial P_u} |_{1, x_{j,n}} \\ \frac{\partial W(t)}{\partial t_0} |_{2, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial \sigma_c} |_{2, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial P_u} |_{2, x_{j,n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial W(t)}{\partial t_0} |_{128, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial \sigma_c} |_{128, x_{j,n}} & \frac{\partial W(t)}{\partial P_u} |_{128, x_{j,n}} \end{bmatrix}$$

第 1 次迭代, $n=1$, 将初始值 (t_0, σ_c, P_u) 代入模型及其偏导, 通过解方程组, 得到 $|dx_1|$ 。

第 3 步:更新参数 $x_{j,n+1} = x_{j,n} + dx_{j,n}$, 计算 $MQE(n) = \sum_{i=0}^i \left[\frac{FFT(i) - W(i, x_{j,n})}{weight'_i} \right]^2$ 。

第 4 步:若 $|dx_n| \leq threshold$, 则退出程序;若不满足, 则判断是否满足 $1 \leq \frac{MQE(n)}{MQE(n+1)} \leq 1 + threshold$ 成立, 若成立则退出程序, 否则返回执行第 2 步。

其拟合效果 Ku 波段见图 3, C 波段见图 4, 平滑黑色曲线为拟合波形, 抖动灰色曲线为校飞波形。

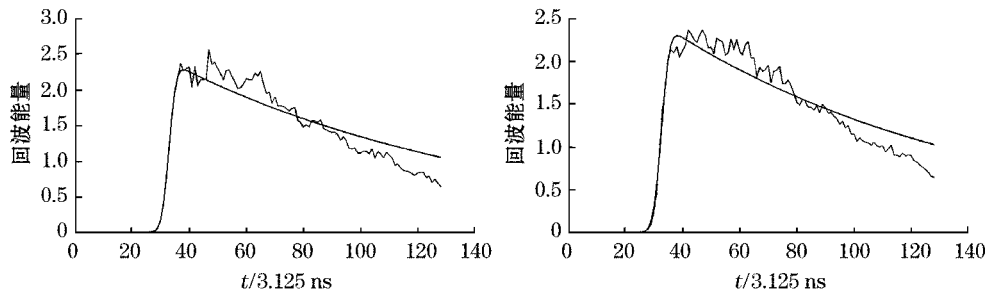


图 3 2009-12-22 Ku 波段波形拟合情况

Fig. 3 Waveform fitting of Ku band on December 22, 2009

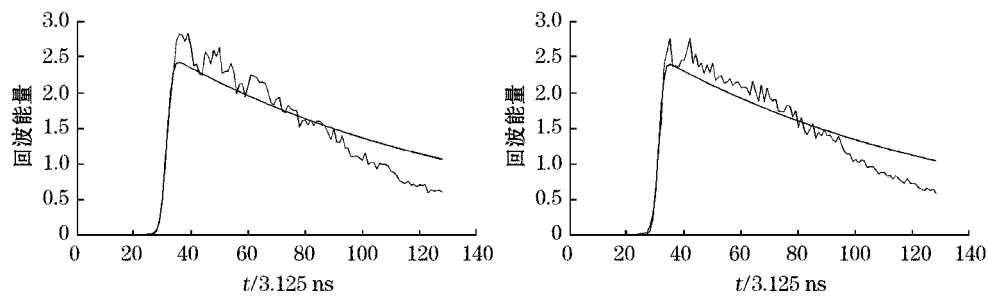


图 4 2009-12-22 C 波段波形拟合情况

Fig. 4 Waveform fitting of C band on December 22, 2009

3 结 果

将提取结果与浮标实测和 Jason-1 有效波高进行比较, 采用平均偏差、均方根两个参数来进行误差分析, 其计算公式分别为

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_w^i - h_b^i) \quad (9)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_w^i - h_b^i)^2} \quad (10)$$

式中, h_w 为校飞波形数据提取的有效波高; h_b 为浮标实测或者 Jason-1 的有效波高。表 2 是 3 天校飞数据 Ku 和 C 波段有效波高均方根和平均偏差的计算结果, 可以看出: 跟浮标和 Jason-1 相比, HY-2 校飞 2 个波段有效波高均方根值都很大, 且两个波段结果都偏大。

表 2 有效波高结果比较(m)

Table 2 The comparison of SWH (m)

日期	HY-2 校飞与 Jason-1(Ku/C 波段)		HY-2 校飞与浮标(Ku/C 波段)		Jason-1 与浮标(Ku/C 波段)	
	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias
2009-12-09	2.882/1.617	2.859/1.549	2.918/1.664	2.890/1.620	0.135/0.265	-0.08/-0.175
2009-12-19	1.825/0.767	1.771/0.532	—	—	—	—
2009-12-22	1.842/0.893	1.809/0.788	1.915/0.875	1.885/0.844	0.191/0.387	-0.072/-0.216

注: 表中“/”左边和右边分别为 Ku 波段和 C 波段结果, “—”代表无此项比较所需数据

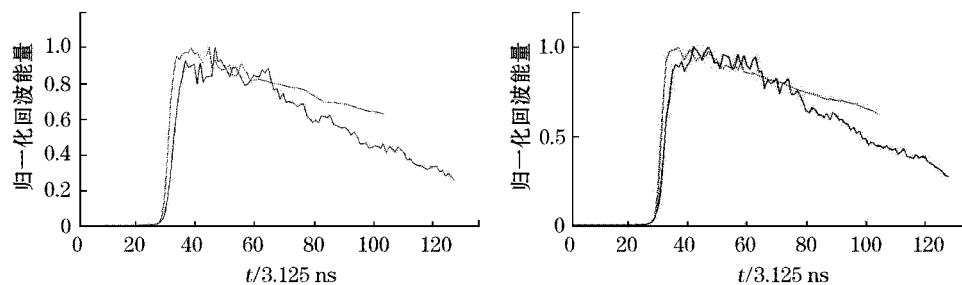


图 5 2009-12-22 Ku 波段波形比较(前 2 个点)

Fig. 5 Comparison of the Ku band waveforms on December 22, 2009 (the first two points)

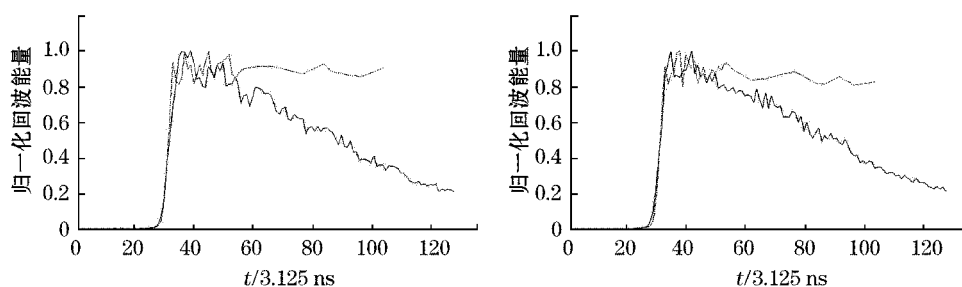


图 6 2009-12-22 C 波段波形比较(前 2 个点)

Fig. 6 Comparison of the C band waveforms on December 22, 2009 (the first two points)

由于 12-22 浮标位置和校飞位置最近, 与 Jason-1 匹配点数最多, 且校飞数据质量相对较好, 因此本研究给出了该天的校飞波形图。2009-12-22 Jason-1 卫星高度计过校飞区域的时间为 8 h 32 min 35.26 s~8 h 32 min 50.5 s, 时间间隔 16 s, 有效数据点 16 个。图 5 和图 6 中黑线表示 HY-2 1 s 平均校飞波形(拟合情况见图 3, 图 4), 每个波形 128 个点; 灰线表示 1 s 平均 Jason-1 波形, 每个波形 104 个点, 2 种波形都进行了去噪和归一化处理。波形对比时, 其位置纬度保持一致, 经度略有差别(最大差别小于 0.05°)。该日 16 个点, 最大时间差小于 14 min。

由图 5, 图 6 可知, 与 Jason-1 波形相比, HY-2 校飞波形 C 波段比 Ku 波段前沿更趋近一致, 提取的有效

波高均方根值也更小。

4 分析及结论

本研究通过对比分析 HY-2、浮标、Jason-1 所测有效波高,得到如下结果:

1)HY-2 校飞数据提取的有效波高与浮标实测有效波高相比,均方根 Ku 波段和 C 波段分别为 1.9~2.9 m 和 0.8~1.6 m;HY-2 校飞有效波高与 Jason-1 有效波高相比,均方根 Ku 波段和 C 波段分别为 1.8~2.8 m 和 0.9~1.6 m。

均方根较大可能的原因是:(1)高度计 L1b 级数据产品处理中,需要对数据进行误指向角校正、仪器校正和系统偏差校正,最后,将星上传下的波形利用内校准处理时的滤波器值进行修正^[7]。本研究未对波形进行 L1b 级处理,而是直接对校飞高度计所测波形进行有效波高提取,所以结果和浮标、Jason-1 相比偏大,存在系统偏差;(2)HY-2 校飞有效波高与浮标相比时,浮标 0.5 h 测量 1 次有效波高,且 12-09 浮标与校飞飞行轨迹最近距离约 8 km,22 日为 700 m,因此 12-09 均方根比 12-22 大了约 1 m;(3)由于 Jason-1 卫星地面轨迹的速度是 5.8 km/s,而校飞飞机飞行速度在 200 m/s 以内,所以 HY-2 校飞高度计所测海面与 Jason-1 所测海面不能一致,时空很难完全匹配。在比较时尽量使空间进行了匹配,时间最大差别不超过 30 min。这种选择方式得到的可对比点数 1 d 一般为十几个。由于校飞数据较少,因此有效点的数量限制对结果有一定影响。

2)通过 HY-2 校飞波形与 Jason-1 波形对比,发现 HY-2 波形前沿比 Jason-1 波形前沿斜率小,后沿比 Jason-1 波形后沿衰减明显偏快。

导致上述结果的可能原因是:HY-2 校飞波形数据未进行相关修正;为了使校飞高度计足印面积接近 Jason-1 足印面积,校飞高度计天线采用 16°的宽波束,这样电磁波入射海面时入射角较大,导致回波能量较小,因此校飞波形后沿衰减更快。

综上所述,该次飞行主要是进行功能性论证,因此缺少必要的前期处理,使得结果存在系统偏差,为此需要进一步开展前期数据修正,以使得卫星发射后,可以得到准确有效波高。

参考文献(References):

- [1] WANG G Y, WANG H Y, XU G C, et al. The principle of altitude measurement of satellite[M]. Beijing: Science Press, 1995: 5. 王广运,王海瑛,许国昌,等. 卫星测高原理[M]. 北京:科学出版社,1995: 5.
- [2] HAYNE G S, HANCOCK III D W. Corrections for the effects of significant wave height and attitude on geosat radar altimeter measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 2837-2842.
- [3] LEE L, CAZENAVE A. Satellite altimetry and earth sciences[M]. Academic Press, 2001: 93.
- [4] HAYNE G. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering[J]. IEEE, Transactions on Antennas Propagation, 1980, 28(5): 687-692.
- [5] XU X Y, LIU H G. Accuracy of altimeter attitude angle estimation by waveform tracking[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences. 2008, 25(1): 54-60. 徐曦煜,刘和光. 高度计姿态角估计算法误差分析[J]. 中国科学院研究生学报, 2008, 25(1): 54-60.
- [6] Centre National d'Etudes Spatiales. Algorithm definition, accuracy and specification Volume 4: CMA altimeter Level 2 processing [R]. Paris: CNES, 2001.
- [7] ZHANG T. Study on data preprocessing for satellite radar altimeter[D]. Beijing: Chinese Academy of Science 2007: 20. 张婷. 星载雷达高度计数据预处理方法研究[D]. 北京:中国科学院, 2007: 20.

Extraction of Significant Wave Height and Its Accuracy Analysis Based on HY-2 Altimeter Calibration Flight Data

LI Xiu-zhong¹, ZHANG You-guang², MENG Jun-min¹

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

Abstract: Based on the HY-2 calibration flight data, the significant wave height (SWH) is retrieved and its accuracy is compared with those from buoys and Jason-1 altimeter. For the extraction of the root mean square (RMS) of the wave heights and hence to obtain the SWH, first is to carry out waveform screening, averaging over 1 second and destriping, and then to make waveform fitting according to the Hayne echo model. The significant wave heights thus obtained are compared with those from the buoys and the Jason-1 altimeter which runs along the same track as that of the HY-2 calibration flight. The results indicate that a systematic bias is present for the accuracy of the SWH resulted from the HY-2 altimeter. This bias is mainly due to the absence of instrumental correction.

Key words: HY-2 altimeter; significant wave height; echo model

Received: March 21, 2011