

一个适用于大误指向角的雷达高度计回波模型 及其在 HY-2A 卫星雷达高度计数据处理中的应用

王 磊^{1,2}, 许 可¹, 刘 鹏^{1,2}, 徐曦煜¹

(1. 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 本文分析了雷达高度计在天线误指向角较大的情况下, 目前常用的回波模型存在的主要问题. 提出了一个带有偏斜度系数的雷达高度计二阶回波模型, 该模型适用于大误指向角情况下的回波重跟踪处理. 本文利用该模型对 HY-2A 卫星雷达高度计的回波数据进行了处理, 并将处理结果与 NDBC(National Data Buoy Center)的海洋浮标观测数据做了比较, 获得了比现有模型更好的结果.

关键词: 雷达高度计; 回波模型; 误指向角; 偏斜度系数; HY-2A; 重跟踪

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1836-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.027

An Echo Model for Big Antenna Mispointing Angle and Its Application in HY-2A Satellite Radar Altimeter

WANG Lei^{1,2}, XU Ke¹, LIU Peng^{1,2}, XU Xi-yu¹

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The main problem of the conventional radar altimeter echo model for big antenna mispointing angle is analyzed, and then an echo model containing the sea surface skewness coefficient is derived. This echo model can be used for retracking the echo wave when the antenna mispointing angle is big. Finally, the model is used to process the data of the HY-2A radar altimeter during the stage of adjusting satellite attitude, and the results are compared with the measurements of the buoys of NDBC(National Data Buoy Center). It shows that the model can give more accurate results.

Key words: radar altimeter; echo model; mispointing angle; skewness coefficient; HY-2A; retracking

1 引言

雷达高度计是一种重要的海洋动力环境测量传感器,其直接测量的产品包括海面高度、海面有效波高和海面后向散射系数.雷达高度计测量数据的进一步反演结果,可以应用于海洋地球物理学、海洋动力学、海洋气候与环境、海冰监测等方面.在国际上,以欧美为表现已发射了系列的高度计卫星,广泛的应用于军事和民用,如 TOPEX/Poseidon、Geosat、GFO、ERS-1、ERS-2、Envisat、Jason-1、Jason-2 等等.我国在 2011 年 8 月成功发射了我国第一颗海洋动力环境卫星,其中雷达高度计为主载荷之一.

卫星雷达高度计在轨获得的原始数据需要下载到地面做进一步处理才能得到高精度的数据产品^[1,2],回

波的地面重跟踪是其中的关键步骤^[3,4].

在高度计天线误指向角小于 0.2 度的条件下,采用目前已有的回波模型进行重跟踪可以得到准确的重跟踪结果,但在误指向角较大时,现有模型已不能准确的反映海面回波的实际情况,在重跟踪时会带来较大的误差.本文分析了雷达高度计在天线误指向角较大的情况下目前常用的回波模型存在的主要问题,提出了一个适用于大误指向角的雷达高度计二阶近似回波模型,并采用该模型对 HY-2A 卫星高度计初始入轨阶段天线误指向角较大情况下获得的回波数据及姿态调整正常后天线误指向角较小情况下获得的回波数据进行了处理,最后将处理结果与 NDBC(National Data Buoy Center)的海洋浮标测量数据做了比较,结果表明,采用该模型可以获得比现有模型更准确的结果.

2 高度计的回波模型

2.1 三项卷积模型

经典的高度计的回波模型如式(1)所示,可以表示为三个函数的卷积^[5~7].此模型准确的描述了回波过程,没有引入近似处理,因此,本文中称这一模型为准确模型.

$$W(\tau) = P_{fs}(\tau) * PTR(\tau) * PDF(\tau) \quad (1)$$

式(1)中, $W(\tau)$ 表示雷达高度计接收到的回波信号的平均功率, $P_{fs}(\tau)$ 是平坦海面的脉冲响应函数, $PTR(\tau)$ 是高度计系统的点目标响应函数, $PDF(\tau)$ 是海面散射点的概率密度函数.

高度计系统的理想点目标响应函数是 sinc 函数的平方:

$$PTR(\tau) = P_r \cdot \left| \frac{\sin(\pi B\tau)}{\pi B\tau} \right|^2 \quad (2)$$

上式中 B 是高度计发射线性调频信号的带宽, P_r 是一个与高度计系统及发射信号功率相关的常数. 高度计系统的实测点目标响应与 sinc 函数平方之间会有一些的差别,在数据处理中应加以修正.

海面散射点的概率密度函数通常用有偏的高斯函数来表示^[8,9]:

$$PDF(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \cdot \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \left[1 + \frac{\lambda_s}{6} \cdot (\eta^3 - 3\eta)\right] \quad (3)$$

上式中, $\eta = \frac{z}{\sigma_s}$, z 是海面散射点距离平均海平面的高度, σ_s 是海面均方根波高.

平坦海面的脉冲响应函数可表示为^[6]:

$$P_{fs}(\tau) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi\right) \exp\left(-\frac{4c\tau}{\gamma H} \cos \xi\right) \cdot I_0\left(\frac{4}{\gamma} \sqrt{\frac{c\tau}{H}} \sin 2\xi\right) \cdot U(\tau) \quad (4)$$

上式中 $I_0(\cdot)$ 是第一类修正的 0 阶贝塞尔函数, $U(\tau)$ 是阶跃函数; A_0 是一个与雷达系统参数及轨道高度 H 、海面的后向散射系数有关的常量; $\gamma = \frac{2}{\ln 2} \sin^2\left(\frac{\theta_w}{2}\right)$, θ_w 是天线主瓣的 3dB 波束宽度,也是一个常量; ξ 是天线指向偏离星下点的角度,即误指向角.

如式(4)所示,平坦海面脉冲响应函数中含有第一类修正的 0 阶贝塞尔函数,同时,高度计系统的实际点目标响应函数无法用明确的数学函数表达,因此,不可能获得完全准确的回波模型的解析表达式.在工程实际应用的业务化数据处理中,若直接采用式(1)的准确模型来进行重跟踪,由于计算量和数据量过大将会使得数据处理无法完成.为了提高处理数据的速度,通常

先采用近似模型对实际回波进行重跟踪,然后再校正由于模型近似带来的误差^[10,11].

2.2 一阶近似模型

目前,较常用的高度计回波近似模型是由 Rodriguez^[12]在 Brown^[6]和 Hayne^[7]的基础上推导出来的.他将海面散射点的概率密度函数函数用式(3)表示;将高度计系统的点目标响应函数用标准高斯函数近似表示:

$$PTR(\tau) = P_r \cdot \left| \frac{\sin(\pi B\tau)}{\pi B\tau} \right|^2 \approx P_r \cdot \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (5)$$

式(5)中, $\sigma_p \approx 0.425 r_i$ ^[6,7]或 $\sigma_p \approx 0.513 r_i$ ^[11], r_i 是高度计的时间分辨率.同时将式(4)所示的平坦海面脉冲响应函数中的贝塞尔函数在第一项截断,并用指数函数近似表示:

$$I_0(\beta\sqrt{\tau}) \approx 1 + \frac{\beta^2\tau}{4} \approx \exp\left(\frac{\beta^2\tau}{4}\right) \quad (6)$$

最终, Rodriguez 得到了一个较为简洁的回波模型^[12],本文中,将其称为一阶近似模型.该模型同时考虑到了高度计的各个重要参数,在误指向角较小的情况下可以很好地表示雷达高度计的真实回波信号,在现代雷达高度计的回波重跟踪中得到了广泛的应用,比如 Jason-1 卫星雷达高度计在地面数据重跟踪时就采用了该模型.

但是,当天线的误指向角较大时, Rodriguez 模型已不能准确的反映高度计的实际回波.其主要原因在于式(6)的近似在误指向角较大时会带来较大的误差.

2.3 适用于大误指向角的二阶近似模型

2004 年, L. Amarouche 等人将 0 阶贝塞尔函数取二阶近似并用指数函数和常数项的组合近似表示,推导出了一个新的近似模型^[13],该模型在误指向角较大时也可适用,但在该模型中海面散射点的概率密度函数是用标准高斯函数表示的,即忽略了海面的偏斜度系数,这实际上是线性海浪理论的结果^[14],即海面是线性的简单波动叠加的结果.对于实际的海面来说,波峰部分陡峭而高,波谷部分平缓而浅,散射点的概率密度函数应是偏态的,忽略偏斜度系数会给重跟踪结果带来一定的误差^[13,15,16].

本文在 L. Amarouche 等人的基础上,将散射点的概率密度函数用带有偏斜度系数的高斯函数表示式(3),得到了一个适用于天线大误指向角情况的高度计回波模型,简称二阶近似模型:

$$W(\tau) = 2W_1(\tau) - W_2(\tau) + N_{\text{Therm}} \quad (7)$$

式(7)中, N_{Therm} 是仪器的热噪声水平.

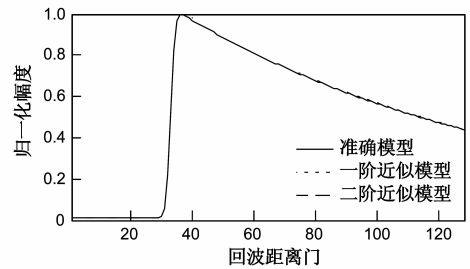
$$W_1(\tau) = A_0 \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi\right) \exp\left(-D_1\left(U_1 + \frac{D_1}{2}\right)\right)$$

$$\cdot \left[\frac{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{U_1}{\sqrt{2}}\right)}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{6} D_1^3\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{6} \cdot \exp^{-\frac{U_1^2}{2}} \cdot (U_1^2 + 3D_1 U_1 + 3D_1^2 - 1) \right] \quad (8)$$

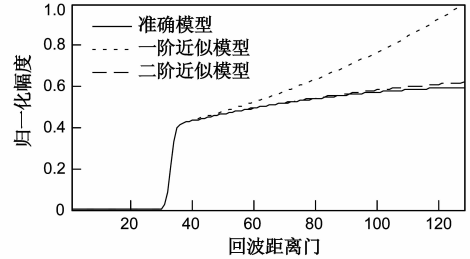
$$W_2(\tau) = A_0 \exp^{-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi} \exp^{-D_2(U_2 + \frac{D_2}{2})} \cdot \left[\frac{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{U_2}{\sqrt{2}}\right)}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{6} D_2^3\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{6} \cdot \exp^{-\frac{U_2^2}{2}} \cdot (U_2^2 + 3D_2 U_2 + 3D_2^2 - 1) \right] \quad (9)$$

在式(11)、(12)中, $\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_s^2}$, $\delta = \frac{4}{\gamma} \frac{c}{h}$ · $\cos(2\xi)$, $\alpha_1 = \delta - \frac{\beta^2}{8}$, $\alpha_2 = \delta$, $D_1 = \alpha_1 \cdot \sigma_c$, $D_2 = \alpha_2 \cdot \sigma_c$, $U_1 = \frac{\tau}{\sigma_c} - D_1$, $U_2 = \frac{\tau}{\sigma_c} - D_2$, $Y_1 = \frac{U_1}{\sqrt{2}}$, $Y_2 = \frac{U_2}{\sqrt{2}}$, $\lambda = \lambda_s \cdot \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\right)^3$, λ_s 是海面的偏斜度系数。

图1是误指向角分别为0.2°和0.7°时不同近似程度的回波模型。从图中可以看出,在误指向角较小的情况下,这两种不同近似程度的回波模型与准确的回波模型之间的误差都很小;但当误指向角增大到0.7°时,一阶近似模型已完全不能反应准确回波的情况,但二阶近似模型的误差仍然很小。



(a) 误指向角为0.2°时的回波模型



(b) 误指向角为0.7°时的回波模型

图1 不同误指向角情况下回波模型比较

3 模型的偏差及校正

为了确定一阶近似模型和二阶近似模型的重跟踪偏差,首先令高度计系统的点目标响应为 sinc 函数的平方,散射点的概率函数采用带有偏斜度系数的高斯函数,平坦海面的脉冲响应函数采用其准确形式,代入式(1)计算海面回波,然后采用最小二乘法^[3],分别以一阶近似模型和二阶近似模型对高度、有效波高、回波幅度及指向角平方这四个参数进行联合估计,最后将

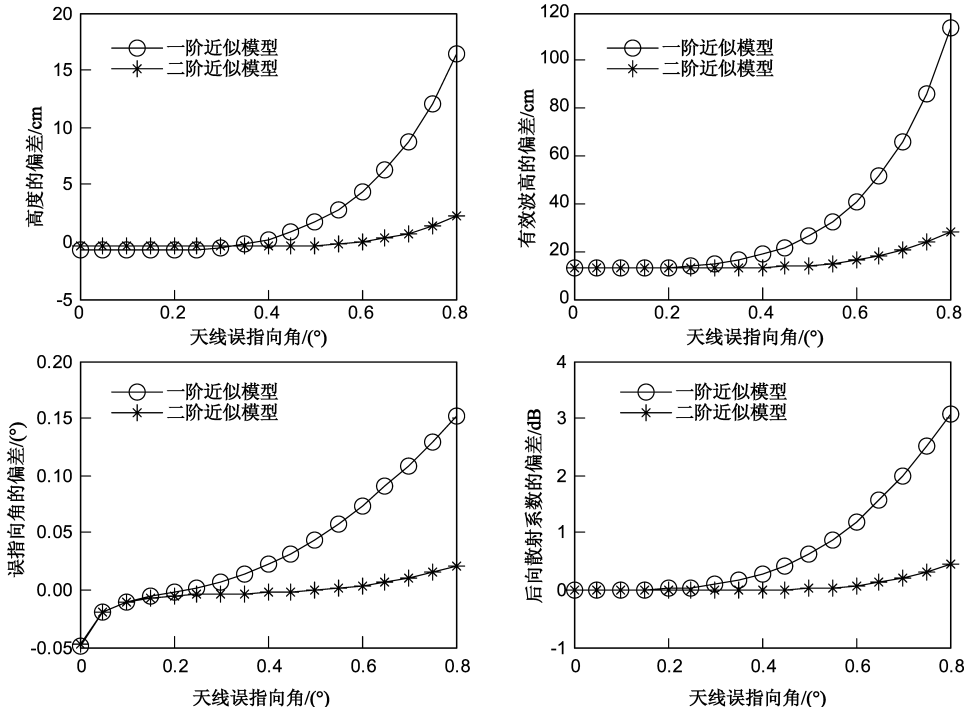


图2 一阶近似模型和二阶近似模型的重跟踪偏差随天线误指向角的变化比较(有效波高为2m)

跟踪结果与其对应的原始输入参数相减,即可得到一阶近似模型和二阶近似模型的跟踪偏差值。

回波模型中,海面的偏斜度系数可以通过对雷达高度计在天线指向正常时获得的回波数据处理得到。在本文中,对 HY-2A 卫星雷达高度计天线指向正常情况下获得的回波数据进行处理得到偏斜度系数为 0.1,这一结果与文献^[15,16]的结果是一致的。

图 2 所示,是当海面有效波高有 2m 时,采用一阶近似模型和二阶近似模型的跟踪偏差值随误指向角的变化曲线。可以看出,在天线误指向角较小时(小于 0.2°),一阶近似模型和二阶近似模型的跟踪偏差都比较小,两者基本相等;当天线误指向角大于 0.2° 时,一阶近似模型的跟踪偏差随误指向角增大急剧增大,二阶近似模型的偏差则变化很小。

近似模型的重跟踪偏差,可以通过查找表的方式进行修正^[10,11]。

4 HY-2A 卫星雷达高度计的数据处理

2011 年 8 月 16 日 HY-2A 卫星成功发射运行。在 HY-2A 卫星刚入轨后对卫星姿态进行调整期间,雷达高度计获得了大误指向角的观测数据。本文采用第 2 节的二阶回波模型及第 3 节所述的校正方法对其观测数据进行了处理,并将处理结果与 NDBC 的浮标观测数据做了比较。高度计数据与浮标数据的匹配标准为:高度计足迹与浮标的距离不超过 50km,观测时间间隔小于半小时。

表 1 高度计数据反演结果与浮标测量结果的比较(误指向角约为 0.7°)

浮标 ID		41001	41001	41047	46013	46002	46005	41041	
浮标时间		2011-09-01-22:50	2011-09-06-11:50	2011-09-02-22:50	2011-09-06-14:50	2011-09-05-01:50	2011-09-04-01:50	2011-09-01-08:50	
浮标有效波高(m)		1.70	1.97	0.83	1.07	1.90	1.29	3.96	
有效波高(m)	重跟踪结果	二阶模型	1.88	2.14	0.94	1.19	1.43	1.42	4.28
		一阶模型	2.30	2.64	1.36	1.53	1.49	1.78	5.11
	修正量	二阶模型	-0.18	-0.17	-0.11	2.07	-0.17	-0.13	-0.32
		一阶模型	-0.60	-0.67	-0.53	2.47	-0.57	-0.49	-1.15
	修正后结果	二阶模型	1.77	1.98	0.96	-0.12	1.76	1.44	4.10
		一阶模型	1.80	2.04	1.01	-0.46	1.77	1.44	4.17

4.2 指向角正常情况下的回波处理

图 4 所示是 HY-2A 卫星在姿态调整正常后,雷达高度计在较小误指向角情况下的典型回波及重跟踪结果。图中一阶近似模型和二阶近似模型几乎完全重合,都可以与实际回波很好的拟合。此时反演出的高度计天线的误指向角小于 0.2° 。

表 2 是 HY-2A 卫星雷达高度计天线误指向角小于 0.2° 情况下所获数据的处理结果与浮标测量结果的对比。其中一阶近似模型和二阶近似模型重跟踪得到的有效波高基本相等。以浮标测量的有效波高值为真值,

4.1 误指向角较大情况下的回波处理

图 3 所示是 HY-2A 卫星雷达高度计在轨调姿阶段误指向角较大情况下获得的典型回波及重跟踪结果,误指向角的最终反演结果约为 0.7° 。可以看出,二阶近似模型可以比一阶近似模型更好地与实际回波匹配。

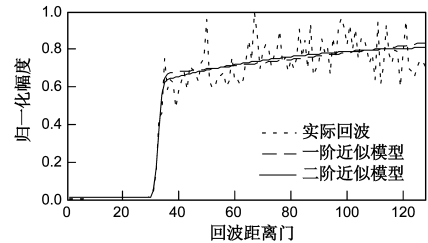


图 3 HY-2A 卫星雷达高度计 0.7° 误指向角时的回波重跟踪结果

表 1 是误指向角约为 0.7° 时高度计回波数据的处理结果与浮标观测结果的比较。以浮标测量的海面有效波高值为真值,可得一阶近似模型和二阶近似模型重跟踪得到的有效波高与真值的偏差,偏差的平均值分别为 -78cm 和 -27cm ,由此可见一阶近似模型比二阶近似模型有较大的偏差;用 3 节所述的修正方法进行修正后,一阶模型和二阶模型的偏差平均值分别为 -18cm 和 -14cm ;重跟踪结果的偏差修正值,二阶近似模型其均值为 -17cm ,一阶近似模型为 -64cm 。可见,在误指向角较大时,二阶近似模型的准确度远高于于一阶近似模型。

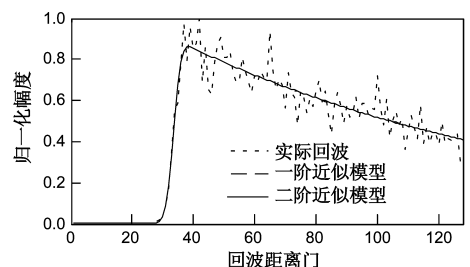


图 4 HY-2A 卫星雷达高度计天线误指向小于 0.2° 情况下的典型回波重跟踪结果

表 2 高度计数据反演结果与浮标测量结果的比较(误指向角小于 0.2°)

浮标 ID		46006	41041	46028	46050	46002	41044	46006	41049	46005	
浮标时间		2011-10-12-15:50	2011-12-18-20:50	2011-12-18-14:50	2011-10-24-14:50	2011-10-25-14:50	2011-10-25-09:50	2011-10-26-15:50	2011-10-24-10:50	2011-10-30-15:50	
浮标有效波高(m)		3.41	2.53	2.53	2.52	2.47	1.95	1.35	1.51	2.56	
有效波高(m)	重跟踪结果	二阶模型	3.58	2.68	2.68	2.67	2.61	2.06	1.41	1.58	2.71
		一阶模型	3.58	2.68	2.68	2.67	2.61	2.06	1.41	1.58	2.71
	修正量	二阶模型	-0.17	-0.15	-0.15	-0.15	-0.14	-0.11	-0.06	-0.07	-0.15
		一阶模型	-0.17	-0.15	-0.15	-0.15	-0.14	-0.11	-0.06	-0.07	-0.15
	修正后结果	二阶模型	3.41	2.52	2.54	2.49	2.42	1.86	1.34	1.44	2.65
		一阶模型	3.41	2.52	2.55	2.50	2.43	1.86	1.34	1.44	2.65

可得一阶近似模型和二阶近似模型重跟踪得到的有效波高与浮标测量结果的偏差也基本相等,偏差的均值为11cm;修正后的结果也基本相等,其偏差的均值为4cm;重跟踪结果所需要的修正值也基本相等,其均值为-13cm.可见在天线误指向角较小的情况下,采用一阶近似模型和二阶近似模型都可以得到准确的海面参数.

5 结论

为了保证雷达高度计能够正常工作,其天线应尽可能指向星下点,但高度计在实际工作中难免会出现误指向角较大的情况.当误指向角较大时,目前常用的一阶近似模型的误差较大,由此得到的重跟踪结果偏差也较大.

本文推导出了一个带有偏斜度系数的二阶近似模型,该模型较一阶近似模型可以更准确的描述高度计的实际回波,它不仅可以在误指向角较小时获得准确的重跟踪结果,在天线误指向角较大时,其跟踪结果的偏差也远小于一阶近似模型.本文采用该模型及传统的一阶近似模型对 HY-2A 号卫星雷达高度计的数据进行了处理,并将处理得到的海面有效波高与 NDBC 海面浮标的测量结果进行了比较.比较结果表明,当天线误指向角较小时,二阶近似模型与一阶近似模型都可以获得准确的海面参数;在天线误指向角较大时,二阶近似模型可以获得比一阶近似模型更准确的海面参数.总体来说,二阶近似模型适用的误指向角范围远大于一阶近似模型,具有更好的适用性.

参考文献

[1] Roca M, Laxon S, Zelli C. The EnviSat RA-2/MWR instrument description, processing chain and data products [A]. Geosciences and Remote Sensing Symposium, 1999 [C]. New Jersey: IEEE Press, 1999. 1689 - 1691.

[2] Peters E R, Plumb K, Veck N. ERS-1 Product Generation at the EODC [J]. International Journal of Remote, 1994, 15(4): 733 - 740.

[3] 张婷. 星载雷达高度计数据预处理方法研究 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2006.

ZHANG Ting. Study on Data Preprocessing for Satellite Radar Altimeter [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)

[4] 张婷, 许可. 一种利用点目标响应和加权窗进行海洋雷达高度计重跟踪的新方法 [J]. 电子学报, 2008, 36(3): 428 - 432.

ZHANG Ting, XU Ke. A new approach to perform ocean re-tracking for radar altimeter with point target response and weight window [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 428 - 432. (in Chinese)

[5] MOORE R K, WILLIAMS C S. Radar terrain return at near vertical incidence [J]. Proc IRF, 1957(45): 228 - 238.

[6] BROWN G S. The average impulse response of a rough surface and its application [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1977, 25(1): 67 - 74.

[7] HAYNE G S. Radar altimeter mean return waveforms from near normal incidence ocean surface scattering [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1980, 28(5): 687 - 692.

[8] Srokosz M A. On the joint distribution of surface elevation and slopes for a nonlinear random sea, with an application to radar altimetry [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(C1): 995 - 1006.

[9] Tokmakian R T, Challenor P G, Guymer T H, et al. The U. K. EODC ERS-1 altimeter oceans processing scheme [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(4): 939 - 962.

[10] HAYNE G S, HANCOCK D W III, PURDY C L, et al. The corrections for significant wave height and attitude effects in the TOPEX radar altimeter [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24, 941 - 24, 955.

[11] THIBAUT P, AMAROUCH L, ZANIFE O Z. Jason-1 altimeter ground processing look-up correction tables [J]. Marine Geodesy, 2004, 27(3-4): 409 - 431.

[12] RODRIGUEZ E. Altimetry for non-gaussian oceans: height biases and estimation of parameters [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(C11): 14107 - 14120.

[13] AMAROUCH L, THIBAUT P, ZANIFE O Z, et al. Improving

the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects[J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(1): 171 - 197.

- [14] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 127 - 142.
- [15] THIBAUT P, AMAROUCHE L, FERREIRA F, et al. Estimation of the skewness coefficient using Jason-1 Altimeter data [A]. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2005[C]. New Jersey: IEEE, 2005. 2556 - 2559.
- [16] GOMEZ-ENRI J, GOMMENDINGER C P, SROKOSZ M A, et al. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(6): 1102 - 1116.

作者简介



王 磊 男, 1986 年 8 月生于甘肃省武威市, 博士生, 主要研究方向为雷达高度计信号处理.

E-mail: nmnghjss@gmail.com



许 可 男, 1967 年 3 月生于辽宁省盖州市, 博士, 研究员, 博士生导师, HY-2A 卫星雷达高度计分系统主任设计师. 主要研究方向为星载雷达高度计系统技术、合成孔径雷达高度计系统技术和信号处理技术.

E-mail: xuke@mirslab.cn



刘 鹏 男, 1983 年出生于湖南省武冈市, 助理研究员, 在职博士研究生. 主要研究方向有高速数字信号处理, 雷达高度计数据处理等.

E-mail: liupeng@mirslab.cn