

X-波段船用雷达观测海洋动力环境要素仿真研究

崔利民^{1,2,3}, 何宜军^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东, 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 10039)

摘要:为了评估 X-波段船载雷达观测海浪和海流参数的能力。基于随机海浪理论和雷达几何成像原理模拟了不同调制影响的 X-波段船用雷达图像序列,介绍了估算海浪参数和海流参数的算法,对影响雷达观测海流和海浪有关因素进行了分析。同时在雷达图像中加入了随机高斯白噪声,并通过数值方法验证了雷达图像的信噪比开方和有效波高之间的线性关系。数值模拟结果说明 X-波段船用雷达能够有效地估算海浪和海流参数,且带有不同噪声水平的雷达系统应具有不同的定标系数。

关键词:X-波段船用雷达; 海浪; 海表面流; 信噪比

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1000-3096(2009)11-0073-05

海上的任何活动,无论是海洋开发与研究,还是海洋环境监测、灾害预测预报和国防都依赖于对海洋动力环境要素基础数据、变化规律的掌握和预测预报,因此迫切要求我们对海洋实现全方位、多手段的立体监测。传统的海浪和海流观测方式大多为海上单点观测,其费用较高,无法大面积进行。随着海洋遥感技术的发展,海流和海浪大面积测量已成为可能^[1]。X-波段船用雷达是能够对海面的状态(主要指海流、海浪和海面风场)进行实时监测的设备,是近年来海洋遥感的一个重要研究方向。在这一领域中,不论理论还是实践方面都取得了丰硕的成果,国际上已经开发了一些商业产品,如挪威的 WAV-EX 和德国的 WaMoS II 等^[2]。

X-波段船用雷达向海表面发射电磁波,同时接收来自海表面电磁回波,既海杂波。尽管这些海杂波包括了丰富的海表面波场的信息^[3],一般为了船只导航,需要通过滤波算法抑制。通过分析这些海杂波,能够获得海浪和流场等参数。早在 20 世纪 60 年代就有海洋学者试图通过船用雷达海杂波图像获得海浪信息。1965 年, Wright^[4] 直接对船用雷达图像波长和波向判读。20 世纪 80 年代 Ziemer 等对雷达图像进行二维傅立叶变换得到了波数能量谱,在此基础上获得了波向和波长等参数,但波向存在着 180° 的方位向模糊。1985 年, Young^[5] 等首先将序列图像进行三维傅立叶变换,得到图像的波数频率谱,并基于波谱的多普勒频移,导出了海表面流计算方法,其成为 X-波段船用雷达观测海洋的主要理论。2004 年, Neito-Borge^[6] 等通过几何光学近似原理数值模拟了船用雷达图像序列,并利用其讨论了图像谱和海浪谱之间的调制传递函数。国内部分科研机

构也做了一些工作包括现场试验和数值模拟等。2001 年,任福安等^[7] 在黄海和渤海海区做观测试验,分别对两个连续图像进行二维傅氏变换,从自功率谱和互功率谱获得自相关函数和互相关函数,进而获得海浪参数,观测值与实际值符合较好。2005 年,李继刚^[8] 等在青岛小麦岛做了观测试验并提出了研制 X-波段雷达的关键技术。2007 年,吴艳琴^[9] 等考虑阴影影响对 X-波段雷达图像仿真,并利用仿真图像和实测数据估算出流速和海浪谱。本文在前人工作的基础上,结合随机海浪理论和雷达几何成像原理模拟了雷达图像序列,同时加入了加性系统随机噪声。数值试验结果表明 X-波段雷达能够有效地估算海浪参数和海表面流速,对于具有不同噪声雷达系统,其信噪比开方和有效波高之间的线性关系应具有不同的定标系数。

1 X-波段雷达图像序列仿真

1.1 无噪声和阴影影响的图像序列仿真

海浪是复杂的随机过程,人们提出了不同的海浪模型研究海浪(如, Longuet-Higgins 模型及双叠加法模型等)。Longuet-Higgins^[10] 模型认为某点的波面高程 $\eta(x, y, t)$ 是由许多个随机余弦波的叠加而成,

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} \cos(\omega_i t - k_i x \cos\theta_j - k_i y \sin\theta_j + \delta_{ij}) \quad (1)$$

收稿日期:2008-06-24;修回日期:2009-09-09

基金项目:中国科学院科研装备研制项目资助(YZ200724)

作者简介:崔利民(1978-),男,黑龙江依安人,博士研究生,研究方向:海洋遥感,电话:0532-82898504, E-mail: cuilimin@ms. qdio. ac. cn

式中, a_{ij} 为振幅, θ_j 为方向角, ω_i 为频率, k_i 为波数, δ_{ij} 为 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布随机初始相位, (x, y) 为波面上某点的坐标。 a_{ij} 通常由下式确定:

$$a_{i,j} = \sqrt{2S(\omega_{i,j}, \theta_{i,j}) d\omega d\theta} \quad (2)$$

式中, $S(\omega, \theta)$ 为海浪方向谱。一般可写成下列形式:

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)G(\omega, \theta) \quad (3)$$

式中, $S(\omega)$ 为海浪频谱, $G(\omega, \theta)$ 为方向分布函数。

选择海浪频谱和方向分布函数对海表面进行仿真, 本文采用 JONSWAP 谱和光易型方向分布函数。 JONSWAP 谱形式为:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \frac{1}{\omega^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{(2\sigma_j^2 \omega_m^2)}\right]} \quad (4)$$

式中 g 为重力加速度; ω_m 为谱峰频率; α 为能量尺度参数, γ 为谱峰升高因子 (γ 的观测值介于 1.5~6.0 之间, 平均值 3.3), σ_j 是描述谱宽度的参数, 其值为:

$$\begin{cases} \sigma_j = 0.07, & \omega \leq \omega_m \\ \sigma_j = 0.09, & \omega \geq \omega_m \end{cases} \quad (5)$$

无因次常数 $\alpha = 0.0817(\bar{X})^{-0.286}$, 无因次风区

$\bar{X} = \frac{gX}{U^2}$ (X 为风区, U 为 10 m 高度处的风速), 其值

范围为 $\bar{X} = 10^{-1}$ 至 10^5 , 无因次峰频率 $\omega_m = 22\left(\frac{g}{U}\right)(\bar{X})^{-0.33}$ 。

光易型方向函数 $G(\omega, \theta)$:

$$G(\omega, \theta) = \frac{2^{2s-1} \Gamma^2(s+1)}{\pi \Gamma(2s+1)} \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right) \quad (6)$$

式中, Γ 为伽玛函数; s 为角散系数, 表示方向分布的集中程度, 与频率和风速有关。

$$s = \begin{cases} s_{\max} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^5, & \omega \leq \omega_p \\ s_{\max} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-2.5}, & \omega \geq \omega_p \end{cases} \quad (7)$$

式中, ω_p 为频谱峰频。合田建议对于风浪采用 $s_{\max} = 10$ 。

模拟海表面时, 需要加入流速, 其利用受多普勒频移影响的重力波弥散方程实现(图 1)。

$$\omega^2 = \omega_0^2 + uk \quad (8)$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)}$, k 是波数向量, d 为海水的深度, g 为重力加速度, u 为近表面流向量^[4]。

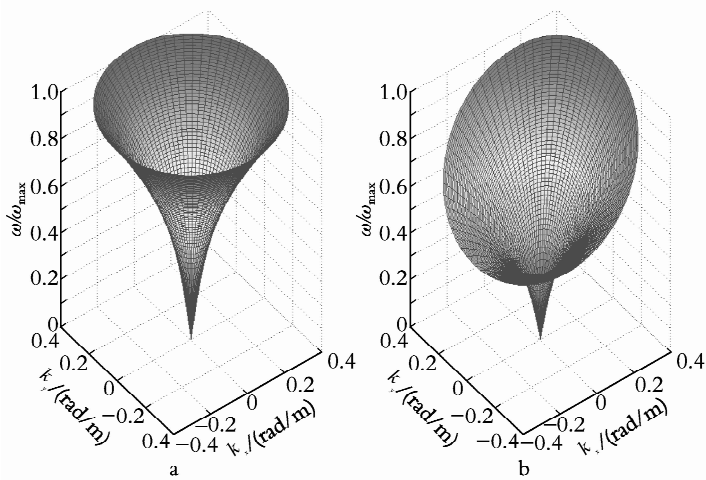


图 1 重力波弥散方程

Fig. 1 Dispersion relation of the linear wave

a. 流速为 0 m/s; b. 流速 1.52 m/s, 流向 30°

a. current value 0 m/s; b. current value 1.52 m/s, current direction 30°

1.2 受噪声和阴影影响的图像序列仿真

雷达能够对海表面成像是由于长重力波调制了雷达散射截面^[11,12], 这种调制关系数学上表示为调制传递函数, 船用雷达主要是阴影调制影响。对于远场和水平极化方式的雷达图像, 几何光学近似假设成立^[6], 因此根据几何光学成像原理对受阴影影响的雷达图像数值仿真。

1.2.1 阴影调制

X-波段船用雷达发射电磁波几乎与海面平行,

由于海表面的起伏, 波面较高的位置将会遮挡其后方的海面。受阴影影响的雷达图像仿真采用下面方法实现(图 2)。

$$\text{Gray}_{\text{sh}}(r, t) = \begin{cases} \text{Gray}(r, t) & \text{otherwise} \\ 0 & \text{if } R(r') < R(r) \text{ and } \theta_0(r', t) \geq \theta_0(r, t) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\theta_0(r, t) = \arctan\left\{\frac{R(r)}{[H - \eta(r, t)]}\right\}$, H 为天线高。

$\text{Gray}(r, t)$ 是调整海表面高度为 $0 \sim 255$ 灰度阶, 此处的灰度值是对雷达图像的一种近似^[1]。

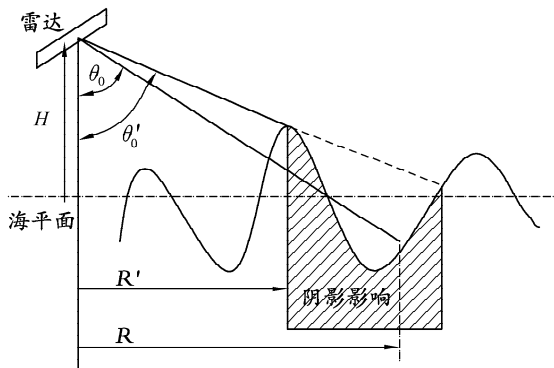


图 2 阴影影响几何示意图

Fig. 2 Schematic representation of the shadowing geometry

1.2.2 随机噪声的加入

雷达回波信号受到噪声的干扰,这些噪声一方面来源于雷达接收机内部,另一方面来源于雷达接收机外部,很多雷达的噪声主要来源于内部。雷达回波信号包括目标回波信号和噪声信号,其可以理想化地描述为以下形式^[13]:

$$I(x, y) = R(x, y) + N(\sigma, \mu) \quad (10)$$

式中, $I(x, y)$ 是雷达回波信号, $R(x, y)$ 目标回波信号。 $N(\sigma, \mu)$ 系统噪声, 通常采用均值 $\mu = 0$ 和方差 σ 的随机高斯白噪声。

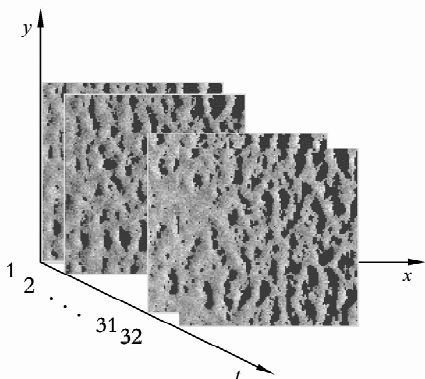


图 3 受阴影调制和噪声影响的雷达图像序列

Fig. 3 Simulated radar images with shadow and white noise

图 3 为受阴影调制和方差为 $\sigma = 0.2$ 的噪声污染, 128×128 像素的 32 幅连续雷达图像序列, 模拟参数设置如下, 风区长度 150 000 m, 流速 2.5 m/s, 流向为 0° , 风速 9.0 m/s, 风向 0° , x 和 y 方向的分辨率分别为 7.5 m, 时间间隔为 1.7 s, 平均水深为 18.0 m。

2 海浪和海流参数估算及结果分析

2.1 波谱分析(三维傅立叶变换)

假定波场具有平稳性的和各项同性, 对其整个波场应用三维傅立叶变换。图像灰度 $I(x, y, t)$ 三维傅立叶变换得到三维波数频率图像谱 $F(k_x, k_y, \omega)$ ^[5], 即:

$$F(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, t) e^{-i(k_x x + k_y y - \omega t)} dx dy dt \quad (11)$$

$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{L_x}, \Delta k_y = \frac{2\pi}{L_y}, \Delta \omega = \frac{2\pi}{T}$$

由于对实数进行傅立叶变换, 结果具有埃尔米特性质, 即:

$$F(k_x, k_y, \omega) = F(-k_x, -k_y, -\omega) \quad (12)$$

方差谱由下面傅立叶形式定义,

$$E(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{L_x L_y T} |F(k_x, k_y, \omega)|^2 \quad (13)$$

式中, L_x, L_y 分别为 X, Y 的长度, T 为雷达持续时间。

2.2 海表面流速计算

1985 年, Young^[5] 等采用最小二乘逼近方法估算海表面流速, 这个方法的主要思想是使理论值 $S_i(k)$ 和能量谱 $E(k_x, k_y, \omega)$ 计算得到真值 $\omega_i(k)$ 之间的差值达到最小。2002 年, Gangeskar^[14] 利用同样的思想估算流速, 考虑图像谱作为权重值, 提高了流速的估算精度。其代价函数为:

$$J = \sum_{\omega=0}^{\omega_N} \sum_{k_x=-k_{xN}}^{k_{xN}} \sum_{k_y=-k_{yN}}^{k_{yN}} (\Delta \omega)^2 E(k_x, k_y, \omega) = \min \quad (14)$$

$$\Delta \omega = \omega - \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)} - k_x u_x - k_y u_y$$

式中, $E(k_x, k_y, \omega)$ 是图像谱, u_x 和 u_y 分别为 x 和 y 上的流速分量, 对上面两个式子整理得,

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Ek_x^2 & \sum Ek_x k_y \\ \sum Ek_x k_y & \sum Ek_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Ek_x (\omega - \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)}) \\ \sum Ek_y (\omega - \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

2001 年, Senet^[15] 在流速估算时运用了迭代方法, 这样大大提高其估算精度, 详细步骤参考文献^[15]。数值模拟产生了流速值范围为 0.1~5.5 m/s, 方向均为 0° 的 65 组数据。根据模拟数据的计算结果分析了不同流速和不同海况对估算流速和流向的影响(图 4, 图 5)。

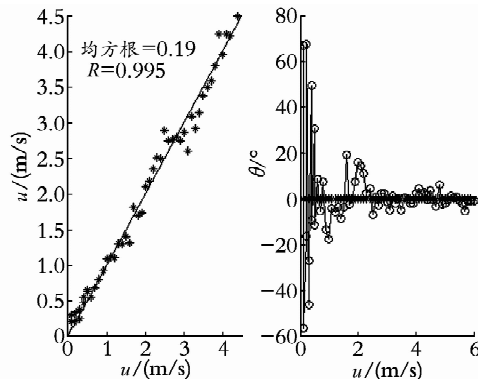


图 4 流速大小对流速和流向估算的影响

Fig. 4 Influence of current value on the estimation of the current value and current direction

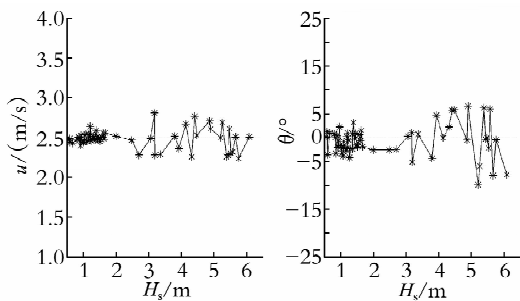


图5 波高对流速和流向估算的影响

Fig. 5 Influence of wave height on the estimation of current value and current direction

由图4分析可知,流速的大小对流向的计算有一定的影响,但对流速值的估算影响较小,输入流速和估算流速的相关程度 $R=0.995$,均方根 $=0.19$ 。当流速越大,流向的估算精度越高,在流速小于 0.1 m/s 时,方向偏差很大,甚至达到 $\pm 60^\circ$ 。

由图5分析可知,随着有效波高的增加,波浪遮挡较严重可能会导致流速大小和方向的估算精度有所下降。

2.3 有效波高计算

雷达对海浪成像机制的非线性,有效波高不能直接从雷达图像中得到。1982年,Alpers^[12]等利用图像信噪比的开方和有效波高线性关系成功地从合成孔径雷达图像中获得有效波高,即:

$$H_s = A + B \sqrt{R_{SN}} \quad (16)$$

式中, A 和 B 是定标系数,需要进行长期海上标定试验。 R_{SN} 为图像信噪比。1994年,Ziemer等首次将

这种方法用到船用雷达图像上,和 SAR (Synthetic Aperture Radar) 相比船用雷达的信噪比计算有所不同。根据文献[16]的方法计算船用雷达信噪比。

(1) 利用弥散方程对图像谱进行滤波把海浪信号和背景噪声分开

$$F_f^{(3)}(k_{x_m}, k_{y_n}, \omega_p) = \begin{cases} F_1^{(3)}(k_{x_m}, k_{y_n}, \omega_p) & \text{if } |\omega_p - \bar{\omega}(|k|)| \leq \Delta\omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

这里, F_f 为滤波后三维图像谱, F_1 为三维图像谱。

(2) 应用调制函数获得二维海浪谱

$$F^{(2)}(k) = 2M(|k|) \left[\int_{\omega > 0} F_f^{(3)}(k, \omega) d\omega \right] \quad (18)$$

式中, $F^{(2)}$ 为二维海浪谱。 $M(|k|) \approx |k|^{-\beta}$ 为调制传递函数, 试验和数值模拟得到 $\beta \approx 1.2^{[6]}$ 。

(3) 信噪比计算

$$R_{SN} = \frac{\int_{\Omega_k} F^{(2)}(k) d^2k}{\int_{\Omega} F(k, \omega) d^2k d\omega} \quad (19)$$

式中, 积分域为:

$$\Omega = \left\{ \frac{(k, \omega) \in \Omega_{k, \omega}}{\omega < \bar{\omega}(k) - \Delta\omega} \right\} \cup \left\{ \frac{(k, \omega) \in \Omega_{k, \omega}}{\omega > \bar{\omega}(k) + \Delta\omega} \right\}$$

和

$$\Omega_k^a = \left\{ \frac{k \in [(-k_{x_c}, k_{x_c}), (-k_{y_c}, k_{y_c})]}{F^{(2)}(k) \geq \alpha \max[F^{(2)}]}, 0 \leq a \leq 1 \right\}$$

参数 α 是减少通过弥散方程滤波得到的海浪信号里背景噪声的贡献。

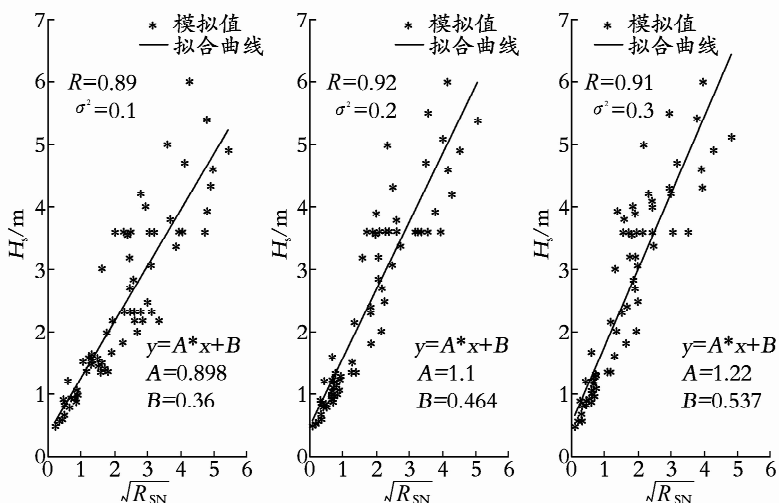


图6 模拟雷达图像的信噪比开方和有效波高散点图

Fig. 6 Scatter plot of simulated radar images sqrt(SNR) versus significant wave height H_s

数值方法产生了有效波高为 0.5~6.0 m 的 74 组数据。利用文献[16]的方法得出信噪比的开方和有效波高具有较好的线性关系,相关系数 R 都大于 0.85。图 6 是加入了带有不同方差白噪声的结果,随着噪声的增加,其线性方程斜率 A 值增加这说明了相同的海况下,信噪比在减少,而截距 B 值也随之增加,则可以看出雷达探测最小波高的能力变小。考虑到雷达噪声水平的不同,每部雷达需要定标自己的系数。

3 总结和讨论

船用 X 波段雷达可以全天候、实时、快速准确地提供海洋动力环境要素参数。能为海洋工程、海洋渔业和舰船运输提供重要的科学数据。本文结合随机海浪理论和雷达几何成像原理对雷达的主要调制阴影调制进行了数值仿真,并利用已有方法对海浪参数和海流参数进行了估算,结果验证了船用雷达观测海洋要素是可行的、有效的,并对结果进行了讨论和分析。

需要提及的是,第一,本方法没有得到真正的雷达回波值,只是对海洋雷达回波的近似表示,因此不能考虑极化因素对参数估算的影响。第二,噪声方面考虑的是加性随机高斯白噪声,考虑乘性斑噪背景噪声需要进一步探讨。第三,当海浪场出现折射、衍射等不均匀现象,不满足傅立叶变换的要求,可以考虑其他变换求解图像谱。第四,掠射情况的海表面电磁散射机理认识不够,另外还有波浪破碎、降雨等现象对散射的影响等需要研究。

参考文献:

[1] 杨劲松. 星载合成孔径雷达海浪遥感测量[J]. 地球物理学报, 2001, **44**(增刊): 22-27.

[2] Nieto-Borge J C, Reichert K, Dittmer J. Use of nautical radar as wave monitoring instrument [J]. **Coastal Engineering**, 1999, **37**: 331-342.

[3] 田建生, 吴世才, 杨子杰, 等. 高频地波雷达海洋回波处理中的噪声研究[J]. 电波科学学报, 2002, **17**(4): 396-400.

[4] Wright F F. Wave observation by shipboard radar [J].

Ocean Science and Ocean Engineering, 1965, **1**: 506-514.

[5] Young I R, Rosenthal W, Ziemer F. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1985, **90**(C1): 1 049-1 059.

[6] Nieto-Borge J C, Rodriguez G R, Hessenr K. Inversion of marine radar images for surface wave analysis [J]. **Journal of Atmospheric and Ocean Technology**, 2004, **21**: 1 291-1 301.

[7] 任福安, 邵秘华, 孙延维. 船载雷达观测海浪的研究[J]. 海洋学报, 2006, **28**(5): 152-156.

[8] 李继刚, 王剑, 陈诚, 等. X-波段导航雷达测波系统的设计与研究[J]. 海洋技术, 2006, **25**(2): 15-18.

[9] 吴艳琴, 吴雄斌, 程丰, 等. 基于 X 波段雷达的海洋动力学参数提取算法初步研究[J]. 遥感学报, 2007, **11**(6): 817-825.

[10] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003. 148-169.

[11] 何宜军. 成像雷达海浪成像机制[J]. 中国科学(D 辑), 2000, **30**(5): 554-560.

[12] Alpers W, Hasselmann K. Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars [J]. **Int J Remote Sens**, 1982, **3**: 432-446.

[13] 田建生, 吴世才, 杨子杰, 等. 高频地波雷达海洋回波处理中的噪声研究[J]. 电波科学学报, 2002, **17**(4): 396-400.

[14] Gangeskar R. Ocean current estimated from X-band radar sea surface images [J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2002, **40**(4): 783-792.

[15] Senet C M, Seemann J, Ziemer F. The near surface current velocity determined from image sequences of the sea surface [J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2001, **39**(3): 492-505.

[16] Nieto-Borge J C, Hessenr K, Jarabo-Amores P, et al. Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series [J]. **IET Radar, Sonar & Navigation**, 2008, **2**(1): 35-41.

(下转第 104 页)