

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0172-06

# 星载 SAR 水下地形和水深遥感的最佳 雷达系统参数模拟

黄韦良, 傅 斌, 周长宝, 杨劲松, 史爱琴, 厉冬玲

(国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:** 根据星载合成孔径雷达(SAR)浅海水下地形和水深成像机理,建立了浅海水下地形和水深雷达后向散射截面仿真模型。该模型包括奈维-斯托克斯方程、谱作用量平衡方程和雷达后向散射模式。利用该模型仿真结果,探讨了不同波段(P、L、C和X)、不同极化(VV和HH)和不同入射角(20°—70°)的星载 SAR 测量浅海水下地形和水深的最佳能力。研究表明,浅海水下地形和水深遥感的最佳波段为P波段,L波段次之,C波段比X波段要好一些。VV极化 SAR 的测量能力要强于HH极化。20°—40°是星载 SAR 测量浅海水下地形和水深的最佳入射角范围。

**关键词:** 模拟仿真;水下地形;雷达参数

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

星载 SAR 不仅能全天时、全天候、大范围、高空间分辨率测量海面波浪等海洋要素和现象,而且还能给出海底地形等信息。近年的研究表明<sup>[1-3]</sup>,星载 SAR 有很强的获取浅海水下地形和水深信息的能力。

目前人们用于获取浅海水下地形和水深信息的 SAR 图像主要来自 1978 年发射的 Seasat-1 卫星、1991 年发射的 ERS-1 卫星和在轨运行的 JERS-1、Radarsat 和 ERS-2 卫星。但不同的卫星图像所含的浅海水下地形和水深信息量是不一样的。信息量的多少与 SAR 工作波段、极化方式和雷达波束入射角密切相关。浅海水下地形和水深测量的最佳 SAR 工作波段、极化方式和入射角是什么是人们普遍关注的问题。因为这个问题关系到星载 SAR 参数的设计、浅海水下地形和水深信息的提取。本文将根据 SAR 浅海水下地形和水深成像机理,建立仿真模型,模拟浅海水下地形和水深的雷达后向散射截面,探讨星载 SAR 浅海水下地形和水深测量的最佳 SAR 工作波段、极化方式和入射角。

## 2 SAR 浅海水下地形和水深成像机理

微波穿透海水的深度仅为厘米的量级,SAR 不能直接观测到水下地形和水深。SAR 测量的是海面的后向散射。水下地形和水深所以被 SAR 观测到是由于水下地形间接地改变了海面的后向散射特性。海上实验和理论研究指出,SAR 浅海水下地形和水深成像由以下 3 个物理过程组成<sup>[3, 4]</sup>:

- (1) 潮流和海底地形之间的相互作用;
- (2) 变化的表层流与表面波之间的相互作用;
- (3) 雷达波与表面波之间的相互作用。

以上成像机理是我们建立星载 SAR 浅海水下地形和水深仿真模型的物理基础。

## 3 仿真模型

本研究的仿真模型由奈维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程、谱作用量平衡方程和雷达后向散射模式组成,它们分别描述上节所述的 SAR 浅海水下地形和水深成像的 3 个物理过程。

收稿日期: 1999-06-02; 修订日期: 1999-08-16

基金项目: 本研究由国家 863 项目(818-06-02)资助。

作者简介: 黄韦良(1955—),男,研究员。1990 年获英国 Dundee 大学遥感博士学位,1992 年在英国 Southampton 大学完成博士后研究。现从事海洋遥感技术和应用研究,发表学术论文 60 余篇,专著 1 本。

### 3.1 奈维-斯托克斯方程

该方程描述潮流与水下地形之间的相互作用。采用右手笛卡尔坐标系, 东向为  $x$  轴方向, 北向为  $y$  轴方向, 垂直向上为  $z$  轴方向,  $z$  轴的零面取在水平位势面上, 潮流与水深之间的关系可用下式表示:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2(h + \xi)} - \frac{\tau_x}{\rho(h + \xi)} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2(h + \xi)} - \frac{\tau_y}{\rho(h + \xi)} = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \xi)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \xi)v]}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

(1)和(2)式分别为奈维-斯托克斯方程和连续性方程。其中  $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向的流速,  $\xi$  为相对于水平位势面高度,  $h$  为海底与水平位势面之间的距离,  $f$  为科氏参量,  $c$  为谢才(Chézy)参量,  $\tau_x$  和  $\tau_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的风应力,  $\rho$  为海水密度,  $g$  为重力加速度。

### 3.2 谱作用量平衡方程

由于水下地形引起的表层流变化的时空尺度小于表面短波的时空尺度, 表层流与表面短波相互作用可用 Wentzel-Kramers-Brillouin 弱相互作用理论来描述。根据这个理论, 缓慢变化流场中的定常短波谱能量密度的变化满足以下谱作用量平衡方程<sup>[5-7]</sup>

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial \Omega}{\partial k_x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \Omega}{\partial k_y} \frac{\partial A}{\partial y} - \frac{\partial \Omega}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial k_x} - \frac{\partial \Omega}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial k_y} = S \quad (3)$$

其中  $A(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  为作用量谱,  $\Omega(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  为表视频率,  $\mathbf{r} = (x, y)$  为空间变量,  $\mathbf{k}$  为波数,  $S(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  为表征波浪组成波的能量增加和消耗过程的源函数。作用量谱  $A(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  与能量谱  $E(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  的关系为

$$A = E/\omega \quad (4)$$

其中  $\omega(\mathbf{k})$  为波的固有频率, 满足以下关系

$$\omega = (gk + \tau\rho^{-1}k^3)^{1/2} \quad (5)$$

其中  $\tau$  为表面张力,  $k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ 。表视频率  $\Omega(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$  由下式给出

$$\Omega = \omega + \mathbf{k} \cdot \mathbf{u} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$  为海表层流矢。源函数  $S$  的表达形式

有多种, 在本研究中, 我们使用以下线性表达式<sup>[4]</sup>

$$S = -\mu(A - A_0) \quad (7)$$

其中  $\mu(k)$  为松弛速率或称为波成长速率, 由下式给出<sup>[8]</sup>

$$\mu = \omega u_* / C_p \cos\varphi (0.01 + 0.016 u_* / C_p |\cos\varphi|) [1 - \exp(-8.9 \sqrt{u_* / C_p - 0.03})] \quad (8)$$

其中  $\varphi$  为风向与波向间的夹角,  $u_*$  为磨擦风速。  $A_0(\mathbf{k})$  为平衡作用量谱, 与平衡波高谱  $\psi_0$  有以下关系

$$A_0 = \psi_0 \rho \omega / k \quad (9)$$

其中  $\psi_0(\mathbf{k})$  由下式表示<sup>[9]</sup>

$$\psi_0 = PW(u_{10}/u_n)^\beta k^{-4} S_P \quad (10)$$

式中  $P(k, u_{10})$  与峰值波数  $k_P$  关系为

$$P = 0.00195 \exp[-k_P^2/k^2 + 0.53 \exp(-(\sqrt{k} - \sqrt{k_P})^2/0.32k_P)] \quad (11)$$

其中  $k_P = g/u_{10}^2\sqrt{2}$ 。  $u_{10}$  为海面以上 10 m 高度的风速。参量  $W(k)$  用于描述高波数区(布拉格波区)谱的形状, 其表达式为

$$W = \frac{[1 + (k/k_1)^{7.2}]^{0.5}}{[1 + (k/k_2)^{2.2}][1 + (k/k_3)^{3.2}]^2} \exp(1 - k^2/k_4^2) \quad (12)$$

式中  $k_1 = 280$  rad/m,  $k_2 = 75$  rad/m,  $k_3 = 1300$  rad/m,  $k_4 = 8885$  rad/m。 (10) 式中指数  $\beta(k)$  为

$$\beta = [1 - \exp(-k^2/k_5^2)] \exp(-k/k_6) + [1 - \exp(-k/k_7)] \exp[-((k - k_8)/k_9)^2] \quad (13)$$

式中  $k_5 = 183$  rad/m,  $k_6 = 3333$  rad/m,  $k_7 = 33$  rad/m,  $k_8 = 140$  rad/m,  $k_9 = 220$  rad/m。 延展函数  $S_P(k, u_{10})$  定义为

$$S_P = \exp[-\varphi^2(0.14 + 0.5(1 - \exp(-ku_{10}/c_1)))] + 5 \exp(2.5 - 2.6 \ln(u_{10}/u_n) - 1.3 \ln(k/k_n)) \quad (14)$$

式中  $c_1 = 400$  rad/s,  $k_n = 1$  rad/m,  $u_n = 1$  m/s。

### 3.3 雷达后向散射模式

雷达波与海面波相互作用会产生二类散射, 即小于入射角 ( $0^\circ - 20^\circ$ ) 时的 Kirchhoff 散射和大入射角 ( $20^\circ - 70^\circ$ ) 时的布拉格散射。我们感兴趣的是布拉格散射, 因为星载 SAR 波束的入射角多数在  $20^\circ - 70^\circ$  之间。对于一阶布拉格散射, 雷达波与海面波相互作用可用下式表示<sup>[10]</sup>

$$\sigma_{pq}^0 = 16\pi k_0^4 \cos^4(\theta_0) |g_{pq}(\theta_0)|^2 \psi(k_B) \quad (15)$$

其中  $\sigma^0$  为海面雷达后向散射截面,  $p$  和  $q$  分别为入射和散射雷达波的极化,  $k_0$  为入射雷达波波数,  $\theta_0$  为雷达波束入射角, 函数  $g$  与极化方式有关, 其表达式为

$$g_{VV} = \frac{\epsilon^2(1 + \sin^2\theta_0)}{(\epsilon \cos\theta_0 + \sqrt{\epsilon})^2} \quad (16a)$$

$$g_{HH} = \frac{\epsilon}{(\cos\theta_0 + \sqrt{\epsilon})^2} \quad (16b)$$

其中 V 和 H 分别表示垂直和水平极化,  $\epsilon$  为海水的复介电常数。(15)式中  $k_B$  为布拉格波数, 由下式给出

$$k_B = 2k_0 \sin\theta_0 \quad (17)$$

(15)和(17)式说明在一阶布拉格散射为海面主要散射机制的情况下, 海面的雷达后向散射截面与波高谱成正比。

## 4 仿真计算

### 4.1 参数条件

#### 雷达参数

仿真 SAR 工作波段为 P、L、C 和 X 波段, 波长分别为 68.8、23.5、5.56 和 3.1 cm。发射和接收的雷达波极化方式为 VV (垂直发射垂直接收) 和 HH (水平发射水平接收)。雷达波束入射角  $\theta_0$  为  $20^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $70^\circ$ 。卫星飞行方向与  $x$  方向垂直, 由南向北。 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为沙坡前后坡度。

#### 水下地形及水深

水下地形形状为我国浅海海区较为常见的锯齿状沙坡(图 1), 地形梯度方向为  $x$  方向, 沙坡坡高  $d$  和坡高水深  $h_1$  取以下几种情况, 即  $d$  为 1, 4, 7, 10 m,  $h_1$  为 1, 5, 10, 15, 20, 25 和 30 m。

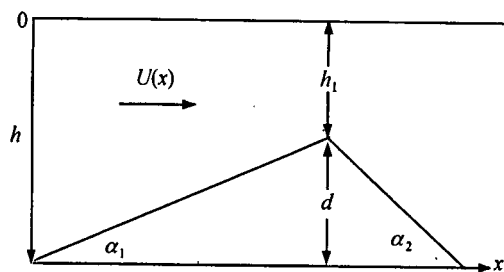


图 1 二维浅海水下地形示意图

Fig. 1 Schematic of the underwater bottom topography

#### 潮流和风

仿真海区潮流流向为  $x$  方向, 流速  $u_0 = 0.5$  m/s。海区风向与潮流方向一致, 风速  $u_{10} = 5$  m/s。

## 4.2 计算方法

图 2 为海面雷达后向散射截面仿真计算流程图, 整个计算由 3 部分组成。首先根据已知初始潮流值和水深条件, 采用差分法求解奈维-斯托克斯方程, 得到浅海水下地形海表层流速; 其次, 输入风速风向和海表层流速, 利用特征线方法由谱作用量平衡方程计算作用量谱; 最后, 通过对雷达后向散射模式的积分运算, 得到雷达后向散射截面。

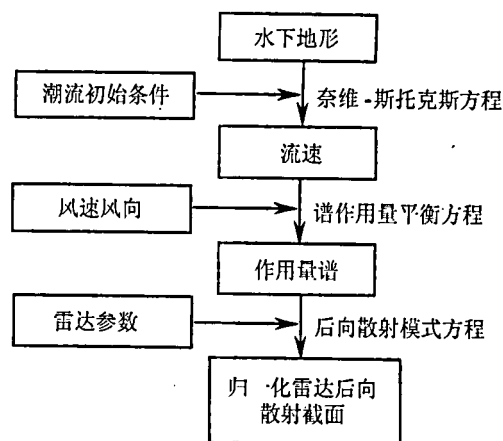


图 2 海面雷达后向散射截面仿真计算流程图

Fig. 2 Schematic of the procedure for computation of the radar backscattering cross section

## 5 结果分析

$\sigma^0$  与图像灰度值的平方成正比, 由雷达方程所决定。在定量应用中,  $\sigma^0$  值更重要和有意义, 通常要将 SAR 图像灰度值换算成  $\sigma^0$  值。下面将对计算得到的水下地形和水深  $\sigma^0$  图进行分析。

### 5.1 最佳雷达波段

图 3 给出了雷达波束入射角为  $23^\circ$ ,  $d = 10$  m 和  $h_1 = 10$  m 时, P、L、C 和 X 波段 VV 极化的  $\sigma^0$  随水下地形的变化图 3(a)、 $\Delta\sigma^0$  ( $\sigma^0$  与  $\sigma_0^0$  (潮流变化为零时的雷达后向散射截面) 之差) 随水下地形的变化图 3(b) 和水下地形图 3(c)。由图 3 可看出, (1) 所有波段的  $\sigma^0$  都随地形高度的增加由  $\sigma_0^0$  逐渐变小(图 3(a)), 接近沙坡坡顶 ( $x = 573$  m) 处  $\sigma^0$  为最小, 在波段处  $\sigma^0$  发生跃变, 由最小跃变为最大, 然后随地形高度的减小而逐渐趋于  $\sigma_0^0$ ; (2)  $\sigma_P^0$  (P 波段  $\sigma^0$ ) 随地形变化的幅度最大(图 3(a)), 其余依次为  $\sigma_L^0$  (L 波段  $\sigma^0$ )、 $\sigma_C^0$  (C 波段  $\sigma^0$ ) 和  $\sigma_X^0$  (X 波段  $\sigma^0$ ); (3) 沙坡前坡 ( $x = 0-573$  m) 的  $\Delta\sigma_P^0$ 、 $\Delta\sigma_L^0$ 、 $\Delta\sigma_C^0$  和  $\Delta\sigma_X^0$  的绝对值

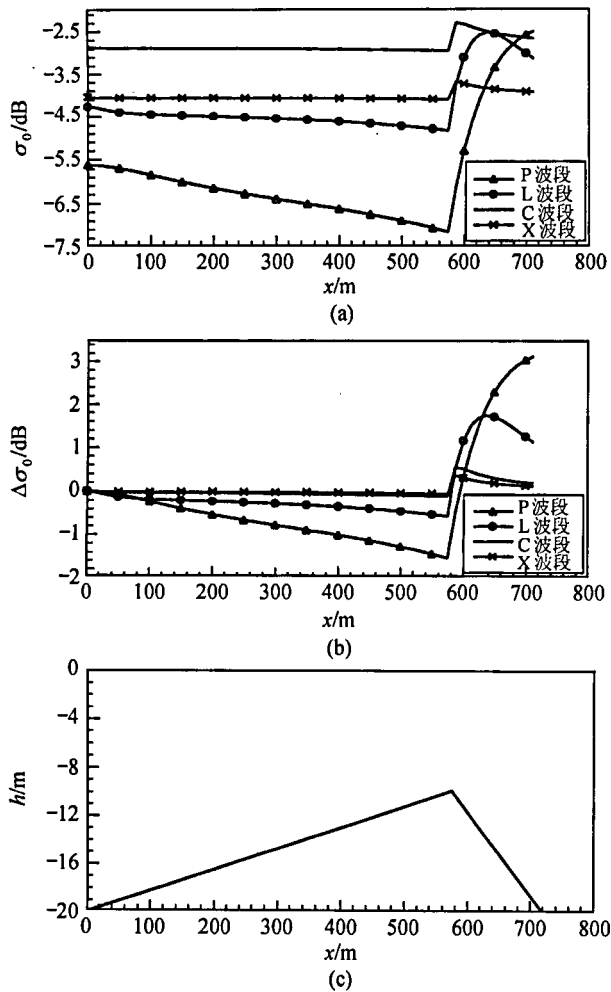


图3  $\sigma^0$  随水下地形的变化(a)、 $\Delta\sigma^0$  随水下地形的变化(b)和 underwater topography (c)

Fig. 3 Variations of  $\sigma^0$ (a) and  $\Delta\sigma^0$ (b) with underwater bottom topography (c)

均小于沙坡后坡 ( $x = 573-720$  m) 的  $\Delta\sigma_P^0$ 、 $\Delta\sigma_L^0$ 、 $\Delta\sigma_C^0$  和  $\Delta\sigma_X^0$  的绝对值(图 3(b)); (4) 在地形的每一点,  $|\Delta\sigma_P^0| > |\Delta\sigma_L^0| > |\Delta\sigma_C^0| > |\Delta\sigma_X^0|$ (图 3(b))。

由上述几点和图像灰度值与  $\sigma^0$  的正比关系, 我们可得出水下沙坡 SAR 图像的灰度分布特征: (1) 相对于背景图像而言, 水下沙坡的图像由暗亮条纹组成, 沙坡的前坡为暗条纹, 沙坡的后坡为亮条纹, 暗亮条纹之间不连续, 暗条纹强度比亮条纹的强度要小; (2) 波长越长的 SAR 图像, 暗亮条纹越清晰, 暗亮条纹的反差也越大。也就是说 P 波段 SAR 图像所含水下地形的信息量最丰富, L 波段 SAR 图像次之, C 波段 SAR 图像所含水下地形的信息量比 L 波段 SAR 图像所含信息量要少; X 波段 SAR 图像所含水下地形的信息量最少。这个结果与近年来机载多波段 SAR 图像的分析结果是一致的<sup>[11]</sup>。

为定量讨论 P、L、C 和 X 波段 SAR 测量浅海水下地形的能力, 我们定义一景 SAR 图像内单波束辐射定标精度为水下地形的测量阈值 ( $\sigma_{\text{阈}}^0$ ), 大于或等于这个阈值, 则认为水下地形可被 SAR 所观测; 小于这个阈值, 则认为水下地形不能被 SAR 所观测。参考 Radarsat 一景图像内的辐射定标精度, 我们取  $\sigma_{\text{阈}}^0 = 1$  dB<sup>[12]</sup>。根据上述定义, 我们计算了 P、L、C、和 X 波段 SAR 可测量的最大水深。图 4 给出了计算结果。图 4 显示, P 波段 SAR 测量水深的的能力最强, X 波段 SAR 测量能力最弱, L 和 C 波段的测量能力间于 P 和 X 波段之间。例如,  $d = 10$  m 时, P、L、C 和 X 波段 SAR 可测量的最大水深分别为 30 m、25 m、18 m 和 6 m, 几乎分别相差一个数量级, P 波段 SAR 可测量水深是 X 波段 SAR 可测量水深的 5 倍。图 4 还显示, 在给定的地形、流、风、雷达入射角、极化方式和卫星飞行方向等条件下, SAR 可测量水深与水下沙坡的坡高有关, 坡高越高, SAR 可观测的水深 ( $h_1 + d$ ) 越深。

### 5.2 极化方式与 SAR 观测能力

本研究的计算结果显示, 在相同的地形、潮流、风场、波段和入射角等条件下, 水下地形的 VV 和 HH 极化的  $\sigma^0$  值没有差异。这说明 SAR 观测浅海水下地形和水深的的能力与极化关系不大。但是, VV 极化的海面雷达后向散射最强, 信噪比最好, VV 极化应是浅海水下地形和水深遥感的首选极化方式。

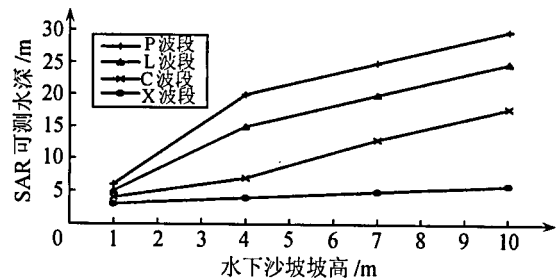


图4 不同水下沙坡坡高条件下不同波段 SAR 可测量水深

Fig. 4 Relation between simulated SAR measurements of water depth at different radar bands and the heights of sandwaves

### 5.3 最佳入射角

图 5 为  $d = 7$  m 和  $h_1 = 10$  m 时, P、L、C 和 X 波段  $\sigma^0$  与入射角的关系曲线。由图 5 可看出, 在布拉格散射的入射角 ( $20^\circ-70^\circ$ ) 范围内, 入射角越小, 海

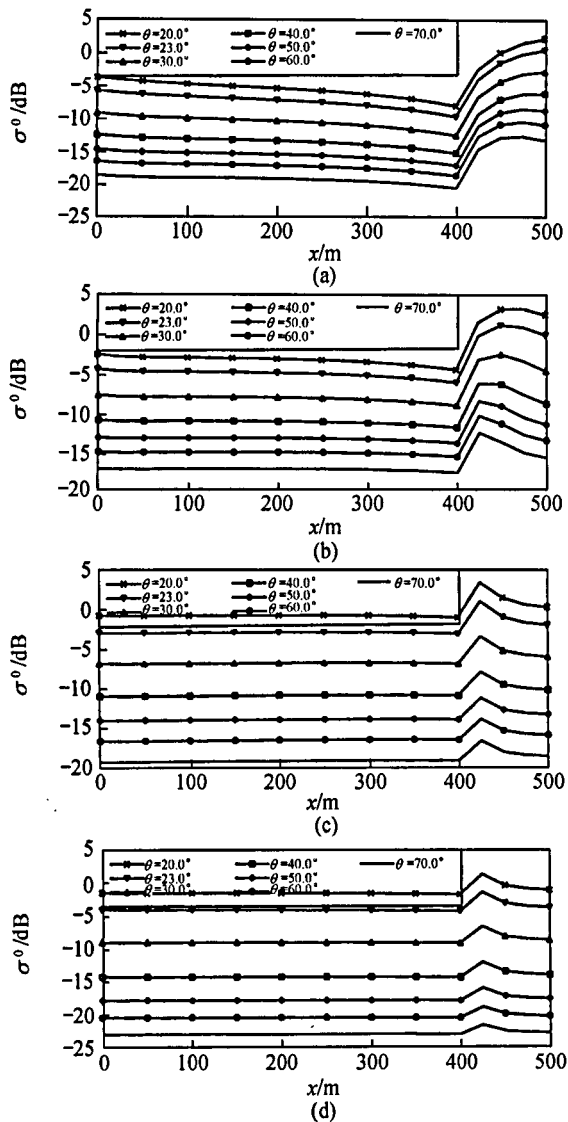


图 5  $d = 7 \text{ m}$  和  $h_1 = 10 \text{ m}$  时, P(a)、L(b)、C(c) 和 X(d) 波段的  $\sigma^0$  随入射角的变化

Fig. 5 Variations of  $\sigma^0$  at P(a), L(b), C(c) and X(d) bands with the radar incidence angles

面的雷达后向散射越强,入射角越大,海面的雷达后向散射越弱。如果以 Radarsat 的噪声等效  $\sigma^0$  值 ( $-18.5 \text{ dB}$ ) 为 SAR 最小可探测信号,则入射角大于  $40^\circ$  时,水下地形信号无法被 SAR 探测到。由此可见, $20^\circ$ — $40^\circ$  是浅海水下地形测量的最佳入射角范围。

## 6 结 论

(1) 雷达波波长越长, SAR 对浅海水下地形和水深的成像越好。P 波段是星载 SAR 浅海水下地形和水深遥感的最佳波段。目前在轨运行的 C 波段

SAR 具有一定的测量浅海水下地形和水深的的能力。

(2) 仿真结果显示,浅海水下地形和水深测量与 SAR 的极化方式关系不大。但 VV 极化的海面雷达后向散射最强,信噪比最好, VV 极化优于 HH 极化。

(3) 对于浅海水下地形和水深测量而言,  $20^\circ$ — $40^\circ$  是最佳雷达波束入射角范围。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] W. G. Huang, M. N. Gao, C. B. Zhou, Y. Z. Zhu, Y. Li. SAR measurements of shallow sea bottom topography [A]. H. D. Guo, G. H. Xu, Spaceborne SAR Applications [C]. China Science and Technology Press, 1996, 172—180. [黄韦良、高曼娜、周长宝、朱廷璋、李炎. SAR 浅海水下地形测量[A]. 郭华东、徐冠华主编. 星载 SAR 雷达应用研究[C]. 中国科学技术出版社, 1996, 172—180.]
- [2] I. Hennings. A historical overview of radar imagery of sea bottom topography [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 (7): 1447—1454.
- [3] W. Alpers, I. Hennings. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 10529—10546.
- [4] J. Vogelzang. The mapping of bottom topography with imaging radar: a comparison of hydrodynamic modulation in some existing models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 1503—1518.
- [5] F. P. Bretherton. Linearized theory of wave propagation [J]. *Lect. Appl. Math.*, 1970, 13: 61—102.
- [6] J. Willebrand. Energy transport in a nonlinear and inhomogeneous random gravity wave field [J]. *Journal of Fluid Mech.*, 1975, 70: 113—126.
- [7] B. A. Hughes. The effect of internal waves on surface wind waves. 2. Theoretical analysis [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 102: 1163—1181.
- [8] J. R. Apel. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 16269—16291.
- [9] G. R. Valenzuela. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves—a review [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1978, 13: 61—85.
- [10] D. W. S. Lodge. Surface expression of bathymetry on SEASAT synthetic aperture radar images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(3): 639—653.
- [11] C. C. Schumilius, D. L. Evans. Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2713—2722.
- [12] S. Parashar, et al. Radarsat mission requirements and concept [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1993, 19(4): 280—288.

## Simulation of Optimal Synthetic Aperture Radar (SAR) Parameters for Mapping Underwater Bottom Topography

HUANG Wei-gen, FU Bin, ZHOU Chang-bao, YANG Jing-song, SHI Ai-qin, LI Dong-lin

(*Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China*)

**Abstract:** A simulation model for the radar backscattering cross section of the sea surface has been developed based on the radar imaging mechanism of underwater bottom topography. The model consists of the Navier-Stokes equation, the action balance equation and the radar backscatter model. The simulation model is solved numerically using the method of characteristics. The results of the simulation model have been used to study the optimal SAR parameters (frequency, polarization and incidence angle) for mapping underwater bottom topography. It is shown that long wavelengths are required. P band is the optimal band for mapping underwater bottom topography, followed by L, C and X bands. Although mapping underwater bottom topography is independent of the polarization, the VV polarization is the best choice because of its large signal-to-noise ratio. The incidence angles between  $20^\circ$  to  $40^\circ$  are needed to map underwater bottom topography by spaceborne SAR.

**Key words:** simulation; underwater bottom topography; radar parameters