

范开国,黄韦良,贺明霞,等. SAR 浅海水下地形遥感探测技术综述.地球物理学进展,2009,24(2):714~720,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.047.

Fan K G, Huang W G, He M X, *et al.* A review about shallow sea bottom topography mapping by SAR. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2):714~720,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.047.

## SAR 浅海水下地形遥感探测技术综述

范开国<sup>1,2</sup>, 黄韦良<sup>1</sup>, 贺明霞<sup>2</sup>, 傅 斌<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室,杭州 310012;

2. 中国海洋大学 海洋遥感教育部重点实验室,青岛 266003)

**摘 要** SAR 已成为浅海水下地形探测的重要技术手段之一.与传统浅海水下地形探测技术相比,SAR 浅海水下地形遥感探测技术具有明显的经济效益.该水深探测技术通过对浅海水下地形 SAR 图像仿真模型的反演求解,从 SAR 图像中提取水下地形信息.本文回顾了 SAR 浅海水下地形遥感探测技术的不同数值模型和应用实例,并针对目前 SAR 浅海水下地形遥感探测技术存在的问题和今后研究方向进行了探讨和总结.

**关键词** SAR,数值模型,浅海水下地形

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.047

中图分类号 P631,P627

文献标识码 A

## A review about shallow sea bottom topography mapping by SAR

FAN Kai-guo<sup>1,2</sup>, HUANG Wei-gen<sup>1</sup>, HE Ming-xia<sup>2</sup>, FU Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China;

2. Key Laboratory of Ocean Remote Sensing, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

**Abstract** Synthetic Aperture Radar (SAR) has become one of the important tools for mapping shallow sea bottom topography. This technique has significant economic efficiency compared with the traditional techniques. Numerical models have been developed to simulate shallow sea bottom topography SAR images. Inversion of these models makes it possible to assess the water depths from SAR images. This paper reviews these numerical models of SAR technique for mapping shallow sea bottom topography, and examples are illustrated including in the coastal areas of China. Some issues about SAR technique available and the research orientation in the future are also discussed and concluded.

**Keywords** synthetic aperture radar, numerical model, shallow water bottom topography

### 0 引 言

浅海水下地形是海洋环境的重要要素.浅海水下地形的探测对海上交通运输、海洋渔业、浅海油气勘测与开发、海底输油气管道铺设等具有重要意义.传统的浅海水下地形探测技术不仅周期长、耗资大,而且对船只无法进入的浅海水域无法探测<sup>[1]</sup>.人们一直在寻找一种既快又便宜的浅海水下地形探测技术.

随着遥感技术的发展,人们提出了浅海水下地形遥感探测的新技术.在海色清澈的浅海水域,激

光<sup>[2]</sup>和可见光<sup>[3]</sup>等水深遥感技术取得了一定的成绩.合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)所具有全天时、全天候的工作优点<sup>[4,5]</sup>和含有丰富浅海水下地形特征信息的高分辨率 SAR 图像,展示了 SAR 浅海水下地形遥感探测的巨大潜力<sup>[6~16]</sup>. SAR 浅海水下地形遥感探测技术已受到世界各国科学家的广泛关注<sup>[17~22]</sup>.

本文主要回顾了 SAR 浅海水下地形遥感探测技术的不同数值模型和应用实例,同时针对目前 SAR 浅海水下地形遥感探测技术存在的问题和今

收稿日期 2008-06-12; 修回日期 2008-09-22.

作者简介 范开国,男,1981年生,山东诸城人,中国海洋大学与国家海洋局第二海洋研究所联合培养博士研究生,研究方向为卫星海洋遥感,已发表学术论文8篇.(E-mail:van.fkg@tom.com.)

后有待研究的方向进行了探讨和总结。

## 1 SAR 浅海水下地形成像机理

SAR 不能直接穿透海水探测到浅海水下地形,是通过与 SAR 工作波段接近的海表面微尺度波共振成像<sup>[23,24]</sup>。在适当的天气和水文条件下(3~10 m/s 的中等风速和大于 0.5 m/s 的强潮流)<sup>[25~28]</sup>,通过浅海水下地形作用下的海表层流场改变海表面微尺度波的空间分布,SAR 可以探测到浅海水下地形信息。国内外研究结果表明,SAR 浅海水下地形的成像机理主要由以下三个物理过程组成<sup>[8,9,11~18,25,26]</sup>。

首先,潮流与浅海水下地形的相互作用改变海表层流场,变化的海表层流场与风致海表面微尺度波相互作用,改变海表面微尺度波的空间分布。最后通过雷达波与海表面微尺度波相互作用,得到表征海表面散射强度的雷达后向散射截面。

## 2 数值模型描述和应用实例

基于 SAR 浅海水下地形成像机理的三个物理过程,发展了 SAR 浅海水下地形遥感探测技术的不同数值模型,并应用于浅海海域的水深探测中。

### 2.1 BAS 技术

荷兰 ARGOS 公司开发的水深估测系统(Bathymetry Assessment System, BAS),根据 SAR 图像所具有的浅海水下地形特征信息和少量的实测水深数据估测最佳浅海水深。可以将 SAR 图像视为把实测水深断面数据拟合起来的智能水深合成器。

#### 2.1.1 数值模型描述

BAS 由两部分组成,(1) 已知浅海水深、潮流和海面风场等信息的 SAR 图像仿真模型;(2) 包含损耗函数的数据同化模型。对于以栅格表示的水深数据,损耗函数包含了仿真与实测 SAR 图像、估测与实测水深值的偏差值和一个平滑标准值。图 1 给出了该技术系统框架图。

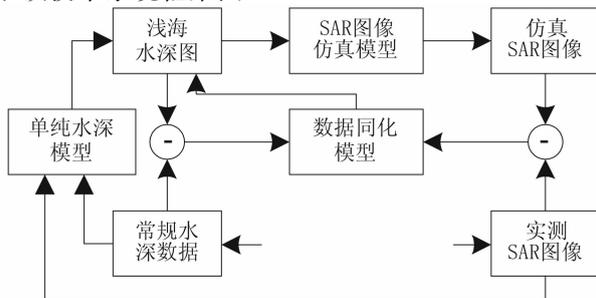


图 1 BAS 技术系统框架图

Fig. 1 Schematic structure of BAS technique

根据 SAR 浅海水下地形成像机理,SAR 图像仿真模型由三个模式组成。描述潮流与浅海水下地形相互作用的流模式,包含了一个类沙丘模型( $uh=c_1$ )和一个类海峡航道模型( $u=c_2\sqrt{h}$ ),其中  $u$  为流速,  $h$  为水深,  $C_1$  与  $C_2$  均为常数。海表层流场的作用使得海表面微尺度波空间分布发生变化,通过求解具有线性松弛率项源函数的作用量谱平衡方程得到海表面微尺度波的作用量谱  $A$ <sup>[29~31]</sup>。一阶近似下,作用量谱平衡方程可表述为<sup>[32~34]</sup>

$$\frac{dx}{dt} \frac{dA}{dx} + \frac{dk}{dt} \frac{dA}{dk} = -\mu(A - A_0), \quad (1)$$

其中  $x$  为微尺度波波包位置,  $k$  为波数,  $\mu$  为松弛率<sup>[33,35,36]</sup>,  $A_0$  为平衡作用量谱。能量谱  $E$  与作用量谱的关系为  $E = \omega A$ ,  $\omega$  为固有频率。  $A = \phi \rho \omega / k$  描述了作用量谱和微尺度波高谱  $\phi$  之间的关系,  $\rho$  为海水密度。

雷达后向散射模型采用了布拉格散射模型<sup>[24]</sup>,认为雷达后向散射截面的变化正比于海表面布拉格波波高谱能量的变化。

数据同化模型中的损耗函数由可利用的表征浅海水下地形特征信息的数据源和一个平滑标准组成

$$J = \sum_{i,j} (\mathbf{r} - \mathbf{s})^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{s}) + \sum_{i,j} (\mathbf{d} - \mathbf{l})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{l}) + \sum_{i,j} \nabla \mathbf{d}^T \mathbf{S} \nabla \mathbf{d}, \quad (2)$$

其中第一项是实测 SAR 图像  $r_{i,j}$  与仿真 SAR 图像  $s_{i,j}$  的比较,  $\mathbf{s}^T$  视为  $\mathbf{s}$  的转置。第二项  $d_{i,j}$ ,  $l_{i,j}$  分别为实测与估测水深值间的比较。  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{M}$  分别为实测 SAR 图像和实测水深数据的协方差矩阵,表征实测数据的质量。最后一项为平滑标项,它的作用是抑制 SAR 图像中斑点噪音的影响,平滑浅海水深图。对数值模型迭代反演浅海水深的同时,通过调整水深值和松弛率的方式寻求损耗函数的最小值,得到最佳估测浅海水深值。

#### 2.1.2 应用实例

BAS 技术在荷兰北部浅海水域博伦水道的应用实例最为典型<sup>[18,20,21]</sup>。实例利用的 ERS-1 SAR 图像成像时间为 1995 年 8 月 3 日,空间分辨率为 12.5×12.5 m。实测水深数据的采样间距为 30 cm,航线间距大约为 200 m。基于具有典型浅海水下地形特征的 SAR 图像,结合间距为 600 m 的实测水深数据,即实测水深数据的 25~35%,得到的估测水深均方差达到 0.36 m。图 2 为具有典型特征的 SAR 图像和利用 BAS 得到估测最佳水深值。

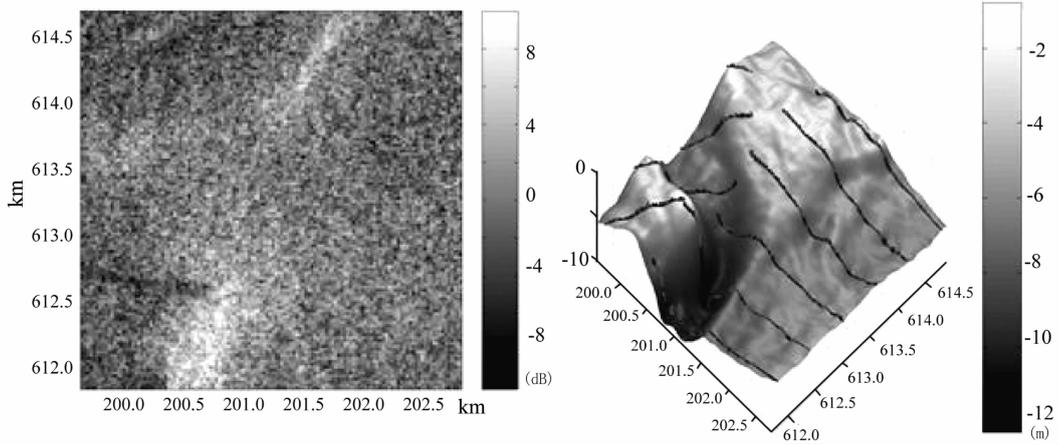


图 2 1995 年 8 月 3 日荷兰北部博伦水道的 ERS-1 SAR 图像和估测水深值<sup>[25]</sup>  
 Fig. 2 ERS-1 SAR image of the Plaatsgat area, Netherlands on 3 Aug 1995 and the estimated bathymetric values

2.2 直接反演技术

浅海水下地形 SAR 图像雷达后向散射截面和浅海水深的变化密切联系,科学家对仿真模型直接反演求解,定量地从 SAR 图像获取水深信息。

2.2.1 数值模型描述

该技术的仿真模型包含奈维-斯托克方程和连续性方程、作用量谱平衡方程、雷达后向散射模型,分别描述了 SAR 浅海水下地形成像的三个物理过程。首先根据辐射定标公式得到的 SAR 图像海表面归一化的雷达后向散射截面,结合雷达后向散射模型,作用量谱、能量谱和微尺度波高谱间的关系求得海表面微尺度波的作用量谱。将作用量谱,海面风速、风向和初始流速、流向等输入作用量谱平衡方

程,计算海表层流速。基于海表层流速、海水密度等参数,采用差分法求解奈维-斯托克方程得到水深值。

公式(3)与(4)为奈维-斯托克方程和连续性方程,描述了潮流与浅海水下地形的相互作用。

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} - FV_y + g \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ + g \frac{V_x \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{c^2(h + \xi)} - \frac{\tau_x}{\rho(h + \xi)} = 0, \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + FV_x + g \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ + g \frac{V_y \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{c^2(h + \xi)} - \frac{\tau_y}{\rho(h + \xi)} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \xi)V_x]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \xi)V_y]}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

其中 $(V_x, V_y)$ 分别为 $(x, y)$ 方向的流速, $\xi$ 为相对水平位势高度, $h$ 为海底与水平位势面之间的高度, $g$ 为重力加速度, $c$ 为谢才参量, $(\tau_x, \tau_y)$ 分别为 $(x, y)$ 方向的风应力。

通过求解具有线性松弛率项源函数的作用量谱平衡方程,得到海表层流场作用下的风致海表面微尺度波的空间分布,雷达后向散射模型采用布拉格散射模型。与 BAS 技术略有不同的是,该技术使用了指定的 Hughes 松弛率<sup>[35]</sup>和 RA 微尺度波高谱<sup>[37]</sup>。

2.2.2 应用实例

直接反演技术已应用于中国近海水域<sup>[22,26]</sup>。图 4 显示了江苏近岸水域小沙阴的 ERS-1 SAR 图像和计算得到的水深图,图中水深已作了潮汐订正。通过与 1:5 万海图水深数据比较显示,计算水深的均方根误差达到 0.42 m。

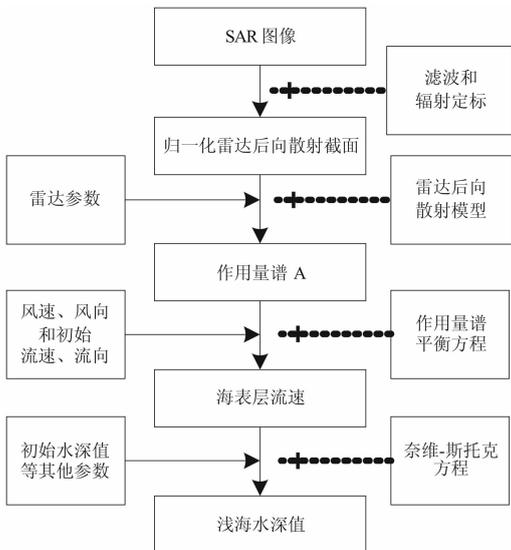


图 3 直接反演技术系统框架图

Fig. 3 Scheme structure of direct inversion technique

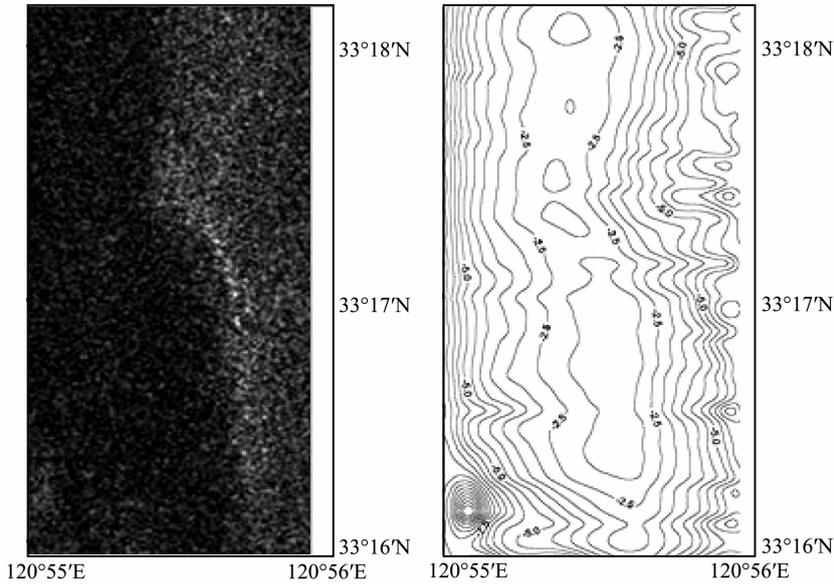


图 4 1995 年 7 月 8 日江苏近海小沙阴 ERS-1 SAR 图像和水深图(m).

Fig. 4 ERS-1 SAR image of Xiaoyinsha sand-wave off east coast of Jiangsu province, China on 8 July 1995 and the calculated water depths.

### 2.3 WNSBE 技术

基于雷达后向散射截面与大尺度背景流场相关的解析式,结合二维浅水动力学方程,发展了 SAR 浅海水下地形遥感探测技术的另一种数值模型.

#### 2.3.1 数值模型描述

利用波数谱平衡方程(Wave Number Spectrum Balance Equation, WNSBE)和布拉格散射模型,得到与大尺度背景流场相关的仿真 SAR 图像灰度值  $G$  的一阶近似解析式<sup>[38~41]</sup>

$$G(V_x, V_y, \theta_1) = \cos^2 \theta_1 \frac{\partial V_x}{\partial x} + \cos \theta_1 \sin \theta_1 \times \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \sin^2 \theta_1 \frac{\partial V_y}{\partial y} \quad (5)$$

其中  $\theta_1$  为海表面风向,上式描述了海表层流场对雷达后向散射截面的调制. 雷达后向散射截面( $\sigma_0$ )与  $G(V_x, V_y, \theta_1)$  值大小成正比<sup>[19,39,41,42]</sup>, 即

$$G = \frac{S_G}{S_{\sigma_0}} (\sigma_0 - \sigma_{0m}) + G_m, \quad (6)$$

$S_G, S_{\sigma_0}$  和  $G_m, \sigma_{0m}$  分别为  $G$  和  $\sigma_0$  的标准偏差和平均值.

二维海表层流场通过浅水动力学方程得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} - fV_y &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{cV_x}{(h+\zeta)}, \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + fV_x &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{cV_y}{(h+\zeta)}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((h+\zeta)V_x)}{\partial x} + \frac{\partial((h+\zeta)V_y)}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

基于公式(5)与(7),求解目标泛函  $J(V_x, V_y, h, \zeta)$  极小化得到浅海水深  $h$

$$J(V_x, V_y, h, \zeta) = \int_{D_0} (f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2) dx dy. \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} f_1 &= \alpha_1 (-fV_y + g\xi_x + cV_x/(h+\xi) + V_x V_{xx} \\ &\quad + V_x V_{xy} + V_{xt}), \\ f_2 &= \alpha_2 (fV_x + g\xi_y + cV_x/(h+\xi) + V_x V_{yx} \\ &\quad + V_y V_{yy} + V_{yt}), \\ f_3 &= \alpha_3 [(l_m l_n + \frac{1}{2} l_a l_\beta \xi_{q\beta} L_m L_n) \frac{\partial u_m}{\partial x_n} - G], \\ f_4 &= \alpha_4 (V_x (h+\xi)_x + V_y (h+\xi)_y \\ &\quad + (h+\xi)V_{xx} + (h+\xi)V_{yy} + \xi_t). \end{aligned} \quad (9)$$

计算目标泛函  $J$  的梯度,给出初始猜想平均水深值和海表层流速、风向等信息,利用最速下降法得到  $V_x, V_y, h, \xi$ . 最速下降法完成后,通过迭代过程得到在目标泛函极小化情况下的浅海水深值.

#### 2.3.2 应用实例

WNSBE 技术已应用于台湾浅滩的水深探测实验中<sup>[43]</sup>. 图 5 为成像于 1995 年 5 月 24 日的台湾浅滩 ERS-2 SAR 图像和反演水深值,其中 SAR 图像分辨率为  $12.5 \times 12.5$  m. 在反演水深水域,沿经、纬度方向各取两个断面的反演水深值与实测水深比较,其均方差达到 3.50 m.

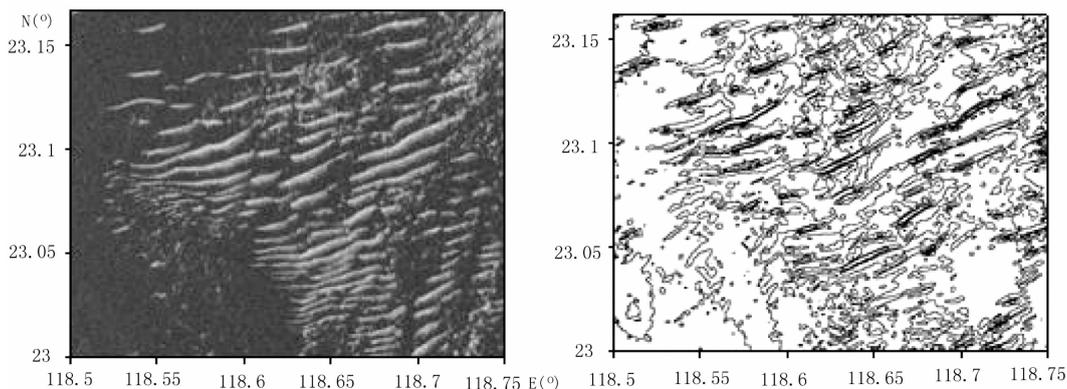


图5 1998年5月24日台湾浅滩 ERS-2 SAR 图像和反演水深值  
Fig. 5 ERS-2 SAR image of Taiwan shoal, China on 24 May 1998  
and the contour map of water depths by inversion

### 3 总结

浅海水下地形 SAR 图像与水深变化密切相关, 这为定量地从 SAR 图像中获取浅海水下地形信息奠定了基础. SAR 已成为浅海水下地形探测的重要手段之一.

SAR 可以在较短时间周期内对同一浅海区域大范围瞬间成像. 利用 SAR 图像, 可以获取船只无法进入的浅海区域的第一手水深信息, 纠正已有海图的错误信息. 并且对水下地形变化频繁, 需要经常进行水文探测的区域可以进行动态监测. 即减少了常规浅海水下地形的探测经费, 同时为常规探测提供最优的测量方案.

#### 3.1 探测技术分析

基于弱水动力学作用理论和布拉格散射理论建立的 SAR 图像仿真模型, 分别描述了 SAR 浅海水下地形成像机理的后两个物理过程. SAR 图像仿真模型虽然可以定性或半定量的解释浅海水下地形 SAR 图像特征, 并应用于浅海水下地形 SAR 图像仿真和地形探测中. 但是高频波段的 ERS-1/2 SAR 图像中有丰富的水深调制信息, 此外当雷达视向与流速梯度方向垂直时 SAR 可以探测到浅海水下地形信息, 上述两个问题与 SAR 图像仿真模型中最主要的两个问题. 此外描述潮流与水下地形相互作用的流模式中采用平均流速代替海表层流速, 没有考虑水体分层及海面风场等对海表层流速的影响.

目前, 所有的 SAR 浅海水下地形遥感探测技术均不能从 SAR 图像本身获取水深信息. BAS 由两个互为补充的一维流模式组成, 可适用于大部分海域, 对地形复杂的海域可以划分为地形简单的小海

域应用. 但一维数值模型过于简单, 对大部分海域很难得到准确的二维水深图, 例如在陡峭水道的倾斜处, 位置上很小的误差都会导致很大的水深误差. 此外, BAS 需要的实测水深数据的数量决定了估测水深值的精度; 在操作过程中, 要对多个物理参数进行调整, 得到最佳估测水深下的极小损耗函数, 因此该技术需要具有一定操作经验的专家实施.

直接反演技术也建立在一维数值模型基础上, 该技术仅适用于浅海地形起伏的海域. SAR 图像本身所具有的高斑点噪声会引入水深计算的误差, 所以 SAR 图像的前期处理要精确. 与 BAS 相比, 此技术更少依赖于常规的实测水深数据.

虽然 MNSBE 技术建立在二维数值模型基础上, 但分辨率不高. 并且 SAR 图像仿真灰度值的一阶近似表达式只与大尺度背景流场和风向有关, 与风速无关. 利用最速下降法计算水深时, 不仅计算过程复杂, 而且初始猜想平均水深值的准确性决定了算法的收敛速度和水深反演的精度.

SAR 图像质量与雷达参数、天气和水文等因素密切相关. SAR 可以在不同条件下对浅海水下地形成像, 但低频信号探测到的浅海水下地形信息高于高频信号<sup>[44]</sup>, 风速情况下的水深调制信号变低甚至被斑点噪声所掩盖, 流速过小无法探测到浅海水下地形信息等特性<sup>[21]</sup>. 目前为止, 上述参数间的定量关系仍没有系统的解决.

#### 3.2 结语

综上所述, SAR 图像仿真模型、SAR 图像质量和计算处理过程等所引入的误差要引起足够的重视并系统地解决.

SAR 图像仿真模型的理论, 要考虑更具体、完

善的理论。例如使用包含风输入、非线性相互作用和能量耗散的非线性、非局地源函数项代替线性局地源函数项;根据更多的现场实验数据,给出更切合浅海海域的微尺度波高谱和松弛率的数学描述;雷达后向散射模型不仅要考虑布拉格波谱的变化,还要考虑流场调制下整个微尺度波高谱的变化对雷达后向散射截面的贡献。

建立包含流体分层、海面风场等因素影响下的二维、甚至三维流模式,使海表层流速场更为精确。开展 SAR 图像二维仿真模型和二维数据同化模型克服一维模型的局限性,减少 SAR 浅海水下地形遥感探测技术对常规水深数据的依赖。对 WNSBE 技术,反演水深分辨率的提高至关重要。

高质量的浅海水下地形 SAR 图像要细心挑选。低频波段、中等风速和强潮流条件下,SAR 能探测到较强的浅海水下地形信息。多波段、多极化浅海水下地形 SAR 图像将是 SAR 图像挑选的趋势。对影响 SAR 图像质量的因素如波段、天气和水文等参数间关系的量化分析对反演水深精度的提高具有重要意义,例如在 WNSBE 技术中,考虑风速对反演水深结果精度的影响。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 梁开龙. 水下地形测量[M]. 北京:测绘出版社,1995.  
Liang K L. Underwater topographic survey [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1995.
- [2] 陈卫标,陆雨田,褚春霖,等. 机载激光水深测量精度分析[J]. 中国激光,2004,31(1):102~104.  
Chen W. B. Lu Y. T. and Chu C. L. et al, Analyses of depth accuracy for airborne laser bathymetry[J]. Chinese Journal of Laser, 2004,31(1):102~104.
- [3] 张骞. 水深遥感研究[J]. 河海大学学报,1998,26(6):68~72.  
Zhang Y. Study of fathoming method by RS technology[J]. Journal of Hohai University,1998,26(6):68~72.
- [4] 陈艳玲,黄斌,丁晓利,等. ERS-2 SAR 反演海洋风矢量的研究[J]. 地球物理学报,2007,50(6):1688~1694.  
Chen Y L, Huang G C, Ding X L, et al. Study on ocean wind vector retrieval from ERS-2 SAR image [J]. Chinese J. Geophys.,2007,50(6):1688~1694.
- [5] 杨桃,陈克雄,周脉鱼,等. SAR 图像中目标的检测和识别研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):617~621.  
Yang G, Chen K X, Zhou M Y, et al. Study evolution of detection and recognition on target in SAR image[J]. Progress in Geophysics, 2007,22(2):617~621.
- [6] Looer D. The observation of tidal patterns, currents, and bathymetry with SLAR imagery of the sea [J]. IEEE J. Ocean. Eng.,1981,6(4):124~129.
- [7] Fu L, Holt B. Seasat views oceans and sea ice with synthetic aperture radar[M]. JPL publications,1982,81~120.
- [8] Alpers W, Hennings I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar[J]. J. Geophys. Res.,1984,89:10529~10546.
- [9] 黄韦良,高曼娜,周长宝,等. 蓬莱附近海区水下地形的星载合成孔径雷达遥感[J]. 东海海洋,1996,14(1):52~56.  
Huang W G, Gao M N, Zhou C B, et al. Spaceborne SAR observations of underwater bottom topography off the north coast of Penglai[J]. Donghai Marine Science,1996,14,(1),52~57.
- [10] 张杰. 合成孔径雷达海洋信息处理与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.  
Zhang J. SAR marine information processing and applications [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] Vogelzang J. The mapping of bottom topography with imaging radar - a comparison of the hydrodynamic modulation in some existing models [J]. Int. J. Remote Sensing,1989,10:1503~1518.
- [12] Hennings I. Radar imaging of submarine sand waves in tidal channels[J]. J. Geophys. Res.,1990,95:9713~9721.
- [13] Shuchman R A, Lyzinga D R and Meadows G A. SAR imaging of ocean-bottom topography via tidal-current interactions; Theory and observations [J]. Int. J. Remote Sensing,1985,6:1179~1200.
- [14] Vogelzang J, Wensink G J, De Looer GP. Sea bottom topography with X-band SLAR: the relation between radar imagery and bathymetry[J]. Int. J. Remote Sensing,1992,13:1943~1958.
- [15] Van Gastel K. Imaging by X-band radar of subsurface features: a nonlinear phenomenon [J]. J. Geophys. Res., 1987,92C:11857~11865.
- [16] Greidanus H, Calkoen C, Hennings I, et al. Intercomparison and validation of bathymetry radar imaging models[J]. IEEE Geo. and Rem. Sen. Symp.,1997,1326~1329.
- [17] Harris P T, Ashley G M, Collins M B. Topographic features of the Bristol channel sea-bed: A comparison of SEASAT (SAR) and side-scan sonar images [J]. Int. J. Remote Sensing,1986,7:119~136.
- [18] Wensink G J, Hesselmanns G H F M, Calkoen C J. The commercial use of satellite observation for bathymetry surveys[J]. Proceedings Inter. Symp. On Opera. of R. S. for Coas. And Mari. Appli., Enschede, Netherlands,1993, 29~36.
- [19] Jin M B, Zhang J, Yuan Y L. Analysis of bathymetry features using SAR image example from the Southern North Sea[J]. Chin. J. Oceanol. Limnol.,1998,16(2):128~136.
- [20] Hesselmanns G H F M, Wensink G J, Van Koppen C G. Bathymetry assessment demonstration off the Belgian coast-BABEL[J]. The Hydro. J., 2000,96:3~8.
- [21] Calkoen C J, Hesselmanns G H F M, Wensink G J. The bathymetry assessment system; efficient depth mapping in shallow seas using radar images[J]. Int. J. Remote Sensing,

- 2001, 22: 2973~2998.
- [22] Huang W G, Fu B. A spaceborne SAR technique for shallow water bathymetry surveys[J]. *J. Coastal Research*, 2004, 43: 223~228.
- [23] Valenzuela G R, Plant W J, Schuler D L. Microwave probing of shallow water bottom topography in the Nantucket Shoals [J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 4931~4942.
- [24] Valenzuela G R. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves a review[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1978, 13: 61~85.
- [25] Jackson C. R. and Apel J. R., Synthetic aperture radar marine user's manual[M]. *Natl. Environ. Satell. Data, and Inf. Serv.*, Nalt. Oceanic and atmos. admin., Silver Spring, 2004, 245~262.
- [26] 傅斌. SAR 浅海水下地形探测[D]. 博士学位论文, 青岛: 中国海洋大学, 2005.  
Fu B. Shallow water bottom topography by mapping SAR [D]. PhD thesis, Ocean University of China, 2005.
- [27] 黄韦良, 傅斌, 周长宝, 等. 星载 SAR 遥感浅海水下地形的最佳海况模拟仿真[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(7): 642~649.  
Huang W G, Fu B, Zhou C B, *et al.* Simulation study on optimal current and winds for the spaceborne SAR mapping of sea bottom topography[J]. *Progr. in Nature Sci.*, 2000, 10(7): 642~649.
- [28] 黄韦良, 傅斌, 周长宝, 等. 星载 SAR 水下地形和水深遥感的最佳雷达系统参数模拟[J]. *遥感学报*, 2000, 4(3): 172~177.  
Huang W G, Fu B, Zhou C B, *et al.* Simulation of optimal SAR parameters for mapping underwater bottom topography [J]. *J. of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 172~177.
- [29] Bretherton F P. Linearized theory of wave propagation[J]. *Lect. Appl. Math.*, 1970, 13: 61~102.
- [30] Longuet-Higgins M S, Bennett J R. Radiation stresses in water waves, a physical discussion with application[J]. *Deep Sea Res.*, 1964, 11: 529~562.
- [31] Vogelzang J. Mapping submarine sand waves with multiband imaging radar 1: Model development and sensitivity analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(C1): 1163~1181.
- [32] Vogelzang J. Mapping submarine sand waves with multiband imaging radar 2: Experimental result and model comparison [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(C1): 1183~1192.
- [33] Hennings I, Lurin B, Didden N. Radar imaging mechanism of the seabed: Results of the C-STAR experiment in 1996 with special emphasis on the relaxation rate of short waves due to current variations[J]. *J. Phys. Ocean.*, 2001, 31: 1807~1827.
- [34] Cooper A L, Chubb S R. Radar surface signature for the two-dimensional tidal circulation over Phers Bank, Nantucket shoals: a comparison between theory and experiment[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 7865~7883.
- [35] Hughes B A. The effect of internal waves on surface wind waves 2. Theoretical analysis[J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, 102: 1163~1181.
- [36] Plant W J, Wright J W. Growth and equilibrium of short gravity waves in a wind-wave tank[J]. *J. Fluid Mech.*, 1977, 82(4): 767~793.
- [37] Romeiser R, Alpers W. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface 2. model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(C11): 25251~25267.
- [38] 袁业立. 论骑行波-1. 波动不稳定性及频率调制[J]. *中国科学(B)*, 1994, 24(3): 317~324.  
Yuan Y L. Discussion on cycle waves[J]. *Science in China (B)*, 1994, 24(3): 317~324.
- [39] 金梅兵, 袁业立. SAR 影像对海底地形变化可视度的仿真模拟与分析[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(增刊): 22~26.  
Jin M B, Yuan Y L. Simulation and analysis of the visibility of the sea bottom topography on the SAR image[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*. 1997, 28 (Suppl): 22~26.
- [40] 袁业立. 海波高频谱形式及 SAR 影像分析基础[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(增刊): 1~5.  
Yuan Y L. Representation of high frequency spectra of ocean waves and the basis for analyzing SAR images [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28(suppl): 1~5.
- [41] 杨俊钢. 基于 SAR 影像的风向反演与水下地形探测实用算法[D]. 硕士学位论文, 内蒙古: 内蒙古大学. 2004.  
Yang J G. Wind direction inversion and practicability research of algorithm of underwater bottom topography detection based on SAR image [D] Master thesis, Inner Mongolia University. 2004.
- [42] 夏长水, 袁业立. 塘沽海区海底地形的 SAR 影像仿真与反演研究[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(4): 437~445.  
Xia C S, Yuan Y L. Simulation and inversion study on the submarine topography in the Tanggu sea area using SAR images [J]. *Advances in Marine Science*. 2003, 21(4): 437~445.
- [43] Yang J G, Zhang J, Meng J M. Underwater sandbanks of Taiwan Shoal detection with SAR image[R]. *Dragon Symp. Iijiang, ESA-NRSCC*. 2006.
- [44] Hennings I, Metzener M, Clakon C J. Island connected seabed signatures observed by multi-frequency synthetic aperture radar[J] *Int. J. Remote Sensing*, 1998, 19(10): 1933~1951.