

# SAR 浅海水下地形遥感研究进展

范开国<sup>1,2</sup>, 黄韦艮<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, 浙江 杭州 310012;

2. 中国海洋大学 海洋遥感教育部重点实验室, 山东 青岛 266003)

**摘要:** SAR 已成为浅海水下地形探测的重要手段之一。通过回顾 SAR 浅海水下地形遥感研究进展, 特别是国内外 SAR 浅海水下地形的成像机理、成像理论研究和遥感探测技术研究的发展, 同时针对目前 SAR 浅海水下地形遥感研究存在的问题和今后有待研究的方向进行了探讨。

**关键词:** SAR; 浅海水下地形; 海洋测深术

**中图分类号:** TP 79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2008)04-0479-07

## 1 引言

浅海水下地形是海洋环境的重要要素。传统的浅海水下地形探测主要以船只平台的声纳或多波束回声探测技术进行现场探测<sup>[1]</sup>, 周期长、范围小、耗资大。而可见光<sup>[2]</sup>、激光<sup>[3]</sup>等水深遥感技术, 虽周期小、范围大、费用低, 但受天气和海水浑浊度等条件限制。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式的微波传感器, 其工作波长较长, 可以不受云层、天气等因素的影响, 具有全天候、全天时、高分辨率的优点<sup>[4]</sup>, 从而受到广泛关注。

SAR 浅海水下地形遥感研究可以追溯到 1969 年<sup>[5]</sup>, 第一颗海洋雷达卫星 Seasat 首次向人们展示了 SAR 浅海水下地形探测的巨大潜力<sup>[6]</sup>。1984 年 Alpers 和 Hennings (AH) 提出的 SAR 浅海水下地形的成像理论模型为 SAR 浅海水下地形定量化研究迈出了重要的一步<sup>[7]</sup>。随后, 世界各国科学家相继基于 AH 成像理论模型对 SAR 浅海水下地形的成像机理、成像理论进行了更加深入的研究。荷兰科学家等将 SAR 浅海水下地形的成像机理和成像理论应用到 SAR 浅海水下地形遥感探测中, 建立了以“水深估测系统(Bathymetry Assessment System, BAS)”<sup>[8]</sup>为代表的 SAR 浅海水下地形遥感探测技术。目前, SAR 已成为浅海水下地形探测的重要手段之一<sup>[4,9]</sup>。

## 2 SAR 浅海水下地形成像机理

SAR 浅海水下地形成像的前提是较强潮流的存在和风致海表面微尺度波的产生<sup>[10]</sup>。一般而言, SAR 浅海水下地形成像过程中, 风引起效应比潮流所带来的要大, 但当风速较小时, 潮流的作用要增加<sup>[11]</sup>。国内外研究结果表明<sup>[10,11]</sup>: 在 3~10 m/s 的中等风速和大于 0.5 m/s 的强潮流条件下, 雷达可以探测到浅海水下地形。而 SAR 电磁波穿透海水的深度仅为厘米量级, 不能直接探测到浅海水下地形, 这引起科学家们极大的兴趣。

早期的雷达浅海水下地形图像被认为是成像的干扰或模糊的油渍, 也有人认为是涌浪所致; 但随即发现此类现象的位置固定, 并且只在流速较大时出现, 因而推断为浅海水下地形<sup>[5]</sup>。直到 1978 年, Seasat 收集到大量的 SAR 浅海水下地形图像, 证实了浅海水下地形在适当的条件下成像于雷达(真实孔径雷达, Real Aperture Radar, RAR 和 SAR)图像<sup>[6,7]</sup>。

SAR 之所以探测到浅海水下地形信息, AH 成像理论模型认为<sup>[7]</sup>: 由于浅海水下地形间接改变了海表面风致微尺度波的空间分布。海表层变化的流场会引起辐聚、辐散现象。在辐聚区海表面粗糙度变大, Bragg 波振幅增加; 在辐散区海表粗糙度降低, Bragg 振幅减少。对应于雷达图像上辐聚区亮

度增强,而辐散区亮度减少。这就是海表层流场对海表面微尺度波的水动力调制过程。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 3 个物理过程组成<sup>[7,12~16]</sup>:

(1) 潮流与浅海水下地形的相互作用改变海表层流场。

(2) 变化的海表面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分布,即水动力调制过程。

(3) 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。

SAR 通过“合成孔径”技术提高方位向分辨率的同时,根据散射单元回波信号的相对频率获取散射单元的位置信息<sup>[4]</sup>。变化的海表层流场使基于观测静止散射单元的零多普勒位置发生移动,从而对 SAR 浅海水下地形图像产生影响,即速度聚束效应。研究结果表明<sup>[7,17]</sup>,速度聚束效应对 SAR 浅海水下地形成像的影响远小于水动力调制效应,甚至可以忽略。图 1 描述了 SAR 浅海水下地形成像的 3 个物理过程。

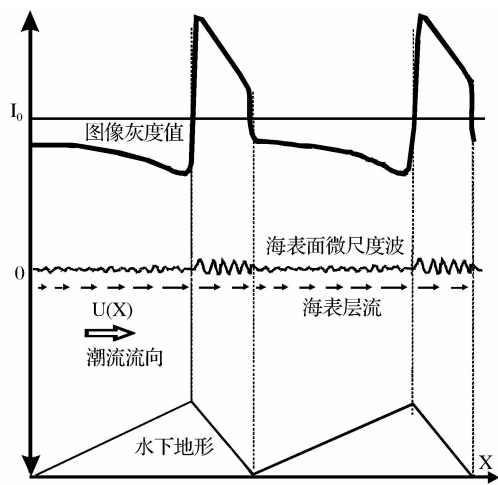


图 1 SAR 浅海水下地形成像的物理模型

Fig.1 Physical model of SAR imaging shallow sea bottom topography

由于海洋锋面、中尺度涡<sup>[18]</sup>和海洋内波<sup>[19]</sup>等海洋现象的雷达成像机理都是因为海表面相应的流场变化引起,因此 SAR 浅海水下地形成像机理过程也可以用来解释上述海洋现象。

### 3 SAR 浅海水下地形成像理论

SAR 浅海水下地形成像机理的 3 个物理过程又可以分别用流模式、波模式和雷达后向散射模式 3 个物理模式来描述。流模式描述潮流与浅海水下

地形的相互作用,波模式描述变化的海表层流场与海表面微尺度波的相互作用,雷达后向散射模式描述雷达波与海表面微尺度波的相互作用。

#### 3.1 流模式理论

具有时间变量的三维潮流与三维浅海水下地形的相互作用是一个复杂的过程,但在浅海水深不大于 50 m 的情况下,海表层流速仅比平均流速高约 1%,在计算时往往忽略<sup>[20~22]</sup>。从而在准一维简化情况下用沿浅海水下地形法线方向的连续性方程<sup>[7]</sup>或者奈维-斯托克斯方程<sup>[23,24]</sup>求得的平均流速代替海表层流速。

#### 3.2 波模式理论

在雷达工作波长和入射角范围内,雷达波的后向散射以 Bragg 散射为主<sup>[25]</sup>,20 世纪 70 年代前后提出的 Bragg 共振理论将标准化的雷达后向散射截面与海面微尺度波高谱联系起来<sup>[26]</sup>,而浅海水下地形引起的缓慢变化海表层流速场中的定常微尺度波能量谱密度的变化满足作用量谱平衡方程<sup>[27,28]</sup>。

基于以上理论,Alpers 和 Hennins 于 1984 年给出了一阶近似下描述波流相互作用的 AH 成像理论模型,即 SAR 浅海水下地形成像的水动力调制理论<sup>[7]</sup>。该理论模型认为海表层流场会引起平衡波高谱的局地微小扰动,利用定常松弛率(驰豫时间的倒数),忽略平流项,在简化情况下得到作用量谱平衡方程的解析式,并结合 Bragg 散射模型,对大尺度背景地形特征下的 L 波段 SAR 浅海水下地形图像所具有的明暗相间的条纹特征进行了合理的解释。这种调制依赖于地形的坡度与地形高度及流场的梯度等因素,其调制强度与海表层流速梯度成正比。

然而 AH 成像理论模型由于忽略平流项,不能合理解释小尺度背景地形特征的 SAR 浅海水下地形成像。1990 年,Hennings 在 AH 成像理论模型基础上建立了包含平流项的 SAR 浅海水下地形成像的理论模型<sup>[14]</sup>,改进后的 AH 成像理论模型提高了 SAR 浅海水下地形位置调制(最大水动力调制信号与最小水深之间的距离)的精度<sup>[29]</sup>,这对 SAR 浅海水下地形的探测异常重要。但由于高频波段的松弛率远大于低频波段<sup>[30,37]</sup>,波高谱恢复到平衡态非常快,从而平流项对高频波段的 SAR 浅海水下地形水动力调制效果不明显<sup>[21]</sup>。

采用射线追踪法对作用量谱平衡方程数值求解过程中<sup>[15,21,32]</sup>,利用了不同的局地项源函数形式,但这些源函数均具有松弛率项。Vogelzang 认为松弛率源函数具有相当量级的水动力调制<sup>[33]</sup>;但一次线

形项源函数适合在中等流速条件下,在较高的海流变化条件下,二次和三次源函数具有更好的实用性<sup>[34]</sup>。源函数的作用是使受扰动的作用量谱密度在弛豫时间内恢复到平衡态,由于非线性波一波相互作用等原因的影响,不同频率的波段和波向之间在能量上存在交换,源函数应为非局地项<sup>[35]</sup>。Van Gastel<sup>[36]</sup>等在苛刻的条件下,考虑了包括风输入、非线性波一波作用、波破碎等情况下的源函数,并对作用量谱平衡方程数值求解,但由于其局限性,此源函数只在一定情况下适用于 X 波段。此外科学家采用不同的波堵近似法解决了由于波堵使作用量谱平衡方程求解不连续的弊端<sup>[20,21]</sup>。

松弛率和微尺度波高谱是水动力调制理论中两个重要的参数,其具体表达式始终不是很统一,一般表示为沿逆风向与风速有关的半径部分和与风向有关的角度部分<sup>[37,38]</sup>。松弛率表征微尺度波能量谱密度受到扰动恢复到平衡态的速率,而在作用量谱平衡方程中,平衡波高谱要首先给出<sup>[35]</sup>。

水动力调制强烈依赖于松弛率和微尺度波高谱的选取,尤其是角度部分的选取<sup>[32]</sup>。Vogelzang<sup>[21]</sup>认为水动力调制主要来自于微尺度波沿顺风向和逆风向的能量分布区。在顺风向分布的微尺度波,具有较大的松弛率<sup>[30,37]</sup>,平流项水动力调制效果不明显。在逆风向具有较小松弛率,平流项在水动力调制中占支配地位且调制与海表层流速成正比,在两部分的共同作用下,呈现锯齿状 SAR 浅海水下地形信息<sup>[21]</sup>。

二维波高谱的角度分布一般认为具有随着风速和频率的增加而离散的特性<sup>[39,40]</sup>,从而在一定条件下,与流速梯度方向垂直向具有一定的微尺度波能量分布。SAR 浅海水下地形研究中二维波高谱的引入<sup>[41]</sup>,解释了 AH 成像理论模型认为当雷达视向与流速梯度向垂直时,SAR 无法探测到浅海水下地形信息这一与实验事实不符的矛盾。Vogelzang 认为此矛盾来源于局地源函数的不足<sup>[42]</sup>,而非微尺度波高谱角度分布的原因<sup>[42,43]</sup>,并采用非局地源函数得到较好的仿真计算结果<sup>[42]</sup>。

### 3.3 雷达后向散射模式理论

AH 成像理论模型的水动力调制依赖于 Bragg 波高谱的相对变化。Alpers 等认为随着雷达信号的增加雷达浅海水下地形信息减少,而实验结果显示,SAR 浅海水下地形可以在多个波段下成像<sup>[17]</sup>,并且 ERS-2 SAR C 波段探测到具有较强调制的 SAR 浅海水下地形信息。这是由于在受调制的海

表面微尺度波中,短 Bragg 波不仅仅受到流场的直接调制,而且受到较大尺度表面波的水动力调制,并且还将骑行在较大尺波表面波上,使散射截面发生倾斜,对 Bragg 波产生影响<sup>[32]</sup>。

Bragg 散射模型在低频波段为 SAR 浅海水下地形提供了很好的解释,但在高频波段,长波对 Bragg 波的影响必须考虑进去,比较常用的是二尺度散射模型<sup>[25]</sup>、Kirchhoff 散射模型<sup>[44]</sup>及其改进的组合表面模型<sup>[32]</sup>。

在相对平静的海面,Bragg 散射模型可以仿真得到 SAR 浅海水下地形的准确信息。在粗糙的海面,二尺度散射模型优于 Bragg 散射模型<sup>[45]</sup>,并且在高频波段优于 Kirchhoff 散射模型<sup>[46]</sup>。二尺度散射模型虽然考虑了 Bragg 波本地入射角的变化,但却忽略了波一流相互作用,附着在长波上的 Bragg 波的分布经常是不对称的,并且在较大入射角条件下,二尺度散射模型会产生明显的误差<sup>[45]</sup>。Greidanus 等通过对不同散射模型比较发现,SAR 浅海水下地形水动力调制仿真结果均小于实验数据,但波长越长,仿真结果越接近实验结果<sup>[24,47]</sup>。

基于二尺度散射模型,Romeiser 等<sup>[32]</sup>提出的改进的组合表面模型不仅考虑了在雷达距离向、方位向的海面倾斜对 Bragg 波的影响,同时考虑了长波对 Bragg 波的水动力调制等对 SAR 浅海水下地形成像的影响。该散射模型对逆风、顺风时后向散射截面分布的不对称性给出了解释,同时修正了以往散射模型对高频波段信号仿真过低和成像理论模型中在雷达视向与流场梯度垂直方向无仿真 SAR 浅海水下地形信息的实验事实矛盾。

## 4 SAR 浅海水下地形遥感探测技术

SAR 浅海水下地形图像具有明暗相间的条纹特征,且具有成像面积比较大等不同于其它海洋现象的 SAR 图像特征。SAR 浅海水下地形图像所表现的雷达后向散射截面的变化与浅海水深有着密切的关系,一般对应着不超过 50 m 的水深<sup>[23]</sup>,但具有较大地形坡度变化的深水区也可以探测到水下地形<sup>[48]</sup>,因此可以利用雷达后向截面变化与水深变化的关系及其 SAR 图像特征定量获取浅海水下地形信息。

SAR 浅海水下地形遥感探测起源于 1986 年<sup>[49]</sup>,目前较具有规模和影响的是荷兰科学家 1993 年开始建立的“水深估测系统”<sup>[8]</sup>,其系统由一个成像仿真模型和一个数据同化模型组成。该系统将成

像机制和成像理论应用于浅海水下地形的探测,而其成像仿真模型是两个互为补充的一维流模式(即平行于浅海水下地形法线方向的沙丘模型  $uh=C1$ ,和垂直于浅海水下地形法线方向的槽道模型  $u=C2\sqrt{h}$ ),一个波模式和一个雷达后向散射模式组成。同时考虑到 SAR 图像所具有的斑点噪声接近甚至大于浅海水下地形信号,直接反演可能会因斑点噪声的存在影响水深反演的精度,因此 BAS 采用数据同化的方式反演水深。该系统使得大部分浅海海区,甚至是较复杂的二维浅海海域都可以得到较准确的浅海水深结果,其精度在实验区达到 30 cm 的误差。

国内,黄韦良、傅斌等通过对 SAR 图像的前期处理,建立了在准一维简化情况下直接从 SAR 图像出发利用 SAR 浅海水下地形成像仿真模型反演浅海水深的方法<sup>[31]</sup>。并利用 ERS-1 SAR 和 Radarsat SAR 图像对我国山东蓬莱附近的浅海水下地形<sup>[12]</sup>、江苏苏北浅滩和台湾浅滩<sup>[9]</sup>进行了探测。该方法与代表国际水平的 BAS 相比,更少依赖于常规水深测量资料。

袁业立<sup>[50,51]</sup>直接从波数谱平衡方程出发得到海波高频谱形式的解析式,描述了海面风、主海波运动和较大尺度海水运动对海表面微尺度波的调制,并利用 Bragg 散射模型,得到雷达后向散射截面与较大尺度海水运动的解析表达式,金梅兵<sup>[52,53]</sup>等在此解析表达式基础上,结合浅海动力学方程组成反演方程组,通过求解该方程组得到 SAR 图像覆盖海域的浅海水深。利用该方法探测了塘沽海区<sup>[54]</sup>、台湾浅滩、双子岛等海域<sup>[9]</sup>浅海水深。但反演方程组求解的收敛结果可能不唯一。

## 5 现存的问题及展望

综上所述,尽管目前已经对 SAR 浅海水下地形遥感有了一定的研究,但以下几个问题并没有得到比较清楚的认识和定量的解决。

在适当条件下,SAR 能探测到浅海水下地形特征。对特定雷达系统而言,雷达图像的后向散射截面强度与浅海水深变化的相关性依赖于风、潮流和浅海水下地形的相互作用,目前这种相关性还没有得到系统地解决。

SAR 大尺度背景地形特征的浅海水下地形图像具有明暗相间的条纹特征。而与大坡度水下地形相关的水动力调制是由复杂的二维甚至三维浅海水下地形影响到海表层流速梯度造成,这种梯度流场

与空间和时间相关,并通过调制海表面微尺度波高谱使得雷达后向散射截面和浅海水下地形信息联系起来。而已提出的成像理论大都基于准一维情况下,且由于众多参数的经验表达式及其待定参数,使得他们只能针对某些 SAR 图像特征来定性地解释观测到现象的一些侧面。并且其成像仿真模型只能在浅海水下地形方向均匀的情况下有效,而在地形方向变化的海域具有局限性,从而单纯利用准一维成像模型只能用于大尺度背景地形特征、方向性好的浅海水下地形。而对浅海水下地形同时存在纵向、横向等地形特征,尤其类似于航道、潮流冲刷槽等地形特征的浅海水下地形不能完全解释,因此要分析浅海水下地形 SAR 图像的各种特征,并在图像特征分析的基础上,建立二维甚至三维成像仿真模型解释 SAR 浅海水下地形。

风是 SAR 浅海水下地形成像过程不可缺少的环境因素,而风速具有强剪切力,海面风仅有平均风的 3~4%,但对于 7 m/s 的平均风速而言,风应力会在海表层产生相对于海表层流不能忽略但与浅海水下地形无关的风生流。虽然大气的不稳定性也会影响海表层流速,但其尺度一般较大,其影响可以忽略。因此海表层流速的变化不仅仅与浅海水下地形相关,而且受到风应力的作用,从而建立不仅包含浅海水下地形因素、风应力对海表层流速的影响,而且还要考虑流场内部剪切力对海表层流速影响的模型是极为重要的。此外还需要建立准确描述二维海表层流场与海表面微尺度波高谱相互作用的二维波一流相互作用模型。

弱相互作用理论是 SAR 浅海水下地形成像理论和地形探测中最薄弱的环节,虽然可以仿真 SAR 浅海水下地形成像,并应用于地形探测中,但是仍存在两个主要的问题没有解决。

(1) 波一流相互作用在高频信号,其成像理论模型计算结果偏低,尽管发展了其它许多散射模型,但仍对高频信号不足,可能由于存在的参数化方式产生较大的松弛率。

(2) 利用目前几乎所有的成像理论模型探测 SAR 浅海水下地形时,当雷达视向与流速梯度方向垂直,即 Bragg 波向垂直于流速梯度方向时,认为 SAR 无法探测到浅海水下地形信息,从而水动力调制被忽略,此时 SAR 无法探测到浅海水下地形信息的成像理论模型与实验事实不符。因此改进已有成像理论模型在这方面的不足对 SAR 浅海水下地形研究极为关键。

此外虽然局地源函数的驰豫时间近似简化了作用量谱平衡方程,并且源函数的源、汇使得作用量谱围绕平衡态发生扰动,但在源函数近似过程中还应该考虑到由于风输入、波一波非线性作用和波破碎(波堵)等非局地原因所带来的作用量谱的变化,改进局地源函数近似不足。另一方面,通过更多的现场实验数据,给出更切合浅海海域微尺度波高谱和松弛率的数学描述。

SAR 浅海水下地形遥感探测的国内外研究工作大都建立准一维的反演模型基础上,其操作性差,并且应用一维情况获取二维的水深图困难,例如在陡峭的航道斜坡。因此需要建立二维的反演模型,并通过数据同化技术减少斑点噪声可能引入的水深反演误差。同时反演过程中,尽量减少现场数据的同时提高水深反演的精度。

#### 参考文献:

- [1] Liang K L. Underwater Topographic Survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1995. [梁开龙. 水下地形测量[M]. 北京:测绘出版社,1995.]
- [2] Zhang Y. Study of Fathoming Method by RS Technology[J]. J. of Hohai University, 1998, 26(6): 68-72. [张蓁. 水深遥感研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(6): 68-72.]
- [3] Chen W B, Lu Y T, Chu C L, *et al.* Analyses of Depth Accuracy for Airborne Laser Bathymetry[J]. Chinese J. of Laser, 2004, 31(1): 102-104. [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.]
- [4] Guo H D. Radar Observations of the Theory and Application [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. [郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.]
- [5] De Loor G. The Observation of Tidal Patterns, Currents, and Bathymetry with SLAR Imagery of the Sea[J]. IEEE J. Ocean. Engin., 1981, 6(4): 124-129.
- [6] Fu L, Holt B. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar[M]. JPL Publications, 1982: 81-120.
- [7] 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.
- [8] Calkoen C J, Hesselmans G, Wensink G, *et al.* The Bathymetry Assessment System; Efficient Depth Mapping in Shallow Seas Using Radar Images[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22: 2973-2998.
- [9] Zhang J. SAR Marine Information Processing and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2004. [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.]
- [10] Jackson C R, 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.
- [11] Huang W G, Fu B, Zhou C B. 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. [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.]
- [12] 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. [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.]
- [13] Cooper A L, Chubb S R. Radar Surface Signature for the Two-dimensional Tidal Circulation over Phelps Bank, Nantucket Shoals: A Comparison between Theory and Experiment[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 7865-7883.
- [14] Hennings I. Radar Imaging of Submarine Sand Waves in Tidal Channels[J]. J. Geophys. Res., 1990, 95: 9713-9721.
- [15] Shuchman R A, Lyzinga D R, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Johannessen J A, Schuchman R A. Coastal Ocean Fronts and Eddies Imaged with ERS 1 Synthetic Aperture Radar[J]. J. Geophys. Res., 1996, 101: 6651-6667.
- [19] Alpers W. Theory of Radar Imaging of Internal Waves[J]. Nature, 1985, 314: 245-247.
- [20] Fu B. Shallow Water Bottom Topography Mapping by SAR [D]. Ph. D. Dissertation, Ocean University of China, 2005. [傅斌. SAR 浅海水下地形探测[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.]
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Fu B, Huang W G, Zhou C B, *et al.* Simulation Study of Sea Bottom Topography Mapping by Spaceborne SAR[J]. Acta Ocean. Sinica, 2001, 23(1): 35-41. [傅斌, 黄韦良, 周长宝, 等. 星载 SAR 浅海水下地形和水深测量遥感模拟仿真[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 35-41.]

- [24] 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. [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.]
- [25] Valenzuela G R. Theories for the Interaction of Electromagnetic and Ocean Waves - a Review[J]. Boundary Layer Meteorology, 1978, 13 : 61-85.
- [26] He Y J. Ocean Wave Imaging Mechanism by Imaging Radar [J]. Science in China(D), 2000, 30(5): 554-560. [何宜军. 成像雷达海浪成像机制[J]. 中国科学(D)[J], 2000, 30(5): 554-560.]
- [27] Bretherton F P. Linearized Theory of Wave Propagation[J]. Lect. Appl. Math., 1970, 13 : 61-102.
- [28] 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.
- [29] Vogelzang J, Wensink G J, De Loor G P. Sea Bottom Topography with X-band SLAR; The Relation between Radar Imagery and Bathymetry[J]. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13 : 1943-1958.
- [30] Hennings I, Lurin B, Didden N. Radar Imaging Mechanism of the Sea Bed; Results of C-STAR Experiment in 1996 with Special Emphasis on the Relaxation Time of Short Waves Due to Current Variations[J]. J. of Physical Oce., 2001, 31: 1807-1827.
- [31] Huang W G, Fu B. A Spaceborne SAR Technique for Shallow Water Bathymetry Surveys [J]. J. Coastal Research, 2004, 43 : 223-228.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Vogelzang J. A Model Comparison Study to the Imaging of Submarine Reefs with Synthetic Aperture Radar[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22(3): 2509-2536.
- [35] Lyzenga D R. Interaction of Short Surface and Electromagnetic Waves with Ocean Fronts[J]. J. Geophys. Res., 1991, 96 (C6): 10765-10772.
- [36] Van Gastel K. Imaging by X-band Radar of Subsurface Features; A Nonlinear Phenomenon[J]. J. Geophys. Res., 1987, 92C: 11857-11865.
- [37] Hughes B A. The Effect of Internal Waves on Surface Wind Waves; 2. Theoretical analysis [J]. J. Geophys. Res., 1978, 102 : 1163-1181.
- [38] 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.
- [39] Hasselmann D E, Duncel M, Ewing J A. Directional Wave Spectra Observed during JONSWAP 1973[J]. J. Phys. Oceanogr., 1980, 10 : 1264-1280.
- [40] Pierson W J, Moskowitz L. A Proposed Spectral form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii [J]. J. Geophys. Res., 1964, 69 (24) : 5181-5190.
- [41] Van Der Kooij M W A, Vogelzang J, Calkoen C J. A Simple Analytical Model for Brightness Modulation Caused by Submarine Sand Waves in Radar Imagery[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100: 7069-7082.
- [42] Vogelzang J. Radar Imaging of Sea Bottom Topography under Various Azimuth Angles [J]. IEEE Geo. and Rem. Sen. Symp., 1999, 1964-1967.
- [43] Apel J R. An Improved Model of the Ocean Surface Wave Vector Spectrum and Its Effects on Radar Backscatter[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99(c8): 16269- 16291.
- [44] Holliday D G, St-Cyr, Wodds N E. A Radar Ocean Imaging Model for Small to Moderate Incidence Angles[J]. Int. J. Remote Sensing, 1986, 7: 1809-1834.
- [45] Durden S L, Vesecky J F. On the Ability of Rough Surface Scattering Approximations to Predict Hydrodynamics Modulation of the Ocean Radar Cross Section; A Numerical Study [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94: 12703-12708.
- [46] Kasilingam D P, Shemdin O H. The Validity of the Composite Surface Model and Its Applications to the Modulation of Radar[J]. J. Remote Sensing, 1992, 13 : 2079-2104.
- [47] 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.
- [48] Fu B, Huang W G. SAR Simulation Study of Steep Slope Bottom Topography[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 1: 33-37. [傅斌, 黄韦良. 大坡度水下地形的 SAR 遥感模拟仿真[J]. 国土资源遥感, 2003, 1: 33-37.]
- [49] 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.
- [50] Yuan Y L. Discussion on Cycle Waves [J]. Science in China (B), 1994, 24(3): 317-324. [袁业立. 论骑行波-1. 波动不稳定性与频率调制[J]. 中国科学(B), 1994, 24(3): 317-324.]
- [51] 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(supplement): 1-5. [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.]
- [52] Jin M B. Yuan Y L. Simulation and Analysis of the Visibility

of the Sea Bottom Topography on the SAR Image[J].  
Oceanologia et Liminologia Sinica. 1997,28 (Supplement):22-26. [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. ]

[53] 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.

[54] 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. [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. ]

# Progress on Remote Sensing of the Shallow Sea Bottom Topography 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,State Oceanic Administration, 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 to map the shallow water bottom topography. In this paper,progress on remote sensing of the shallow water bottom topography by SAR has been reviewed. Especially,SAR imaging mechanism and SAR imaging theory of the shallow water bottom topography and the shallow water bottom topography mapping by SAR are mainly introduced. Meanwhile,we discuss some issues in present of the study on remote sensing of the shallow water bottom topography by SAR and the research orientation in future.

**Key words:** Synthetic aperture radar;Shallow water bottom topography;Bathymetry