

1-14-2022

## A Fast Simulation Method for Ship Target SAR Signal Echo

Yuan Fei

1. Unikinfo LTD, Beijing 100095, China;;3. Information Engineering School of Nanchang University, Nanchang 330031, China;

Jianhong Li

2. The Sixth Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China;;

Yin Hao

2. The Sixth Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China;;

Yuhao Wang

3. Information Engineering School of Nanchang University, Nanchang 330031, China;

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# A Fast Simulation Method for Ship Target SAR Signal Echo

## Abstract

**Abstract:** In order to meet the application requirements of synthetic aperture radar (SAR) in ocean remote sensing, a fast simulation method for the ship target SAR echo generation is presented, which carries out the accurate electromagnetic modeling to the important ship targets. "Four paths" model is used to calculate the complex echo between the ship target and sea surface, and the facet model is used to model the sea surface backscattering. After the two parts of echoes being synthesized, the SAR echo of whole scene is gotten, and the echo is processed by spot SAR imaging processing algorithm to verify the effectiveness. The proposed fast method, avoids the complex electromagnetic simulation on the whole imaging area, effectively improves the electromagnetic calculation efficiency on big scene. By applying the high frequency electromagnetic algorithm in the target area, the electromagnetic scattering property of the ship target is retained, which provides an accurate and efficient simulation algorithm for the SAR echo simulation.

## Keywords

synthetic aperture radar(SAR), radar-cross section, sea surface scattering, radar echo, SAR imaging

## Authors

Yuan Fei, Jianhong Li, Yin Hao, Yuhao Wang, and Hong Sheng

## Recommended Citation

Yuan Fei, Li Jianhong, Yin Hao, Wang Yuhao, Hong Sheng. A Fast Simulation Method for Ship Target SAR Signal Echo[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(1): 11-19.

## 一种舰船目标 SAR 回波的快速仿真方法

袁飞<sup>1,3</sup>, 李建宏<sup>2</sup>, 银皓<sup>2</sup>, 王玉皞<sup>3</sup>, 洪升<sup>3</sup>(1. 北京优诺信创科技有限公司, 北京 100095; 2. 中国电子信息产业集团有限公司 第六研究所, 北京 102209;  
3. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 为满足合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)在海洋遥感的应用需求, 提出一种舰船目标 SAR 成像的快速仿真方法。对成像场景中重点关注的目标进行精确电磁建模, 并利用“四路径”模型计算目标与海面的复合散射回波, 对海面背景采用散射面元法计算回波; 将舰船复合散射回波与海面回波进行合成得到总的 SAR 回波, 利用聚束 SAR 成像处理方法获得 SAR 图像。结果表明: 该算法避免了对整个成像区域进行复杂的电磁仿真, 能够有效降低对海面大场景的电磁计算效率。由于在目标区域采用高频电磁算法, 保留了目标的电磁散射的精细结构, 为精确模拟 SAR 回波提供了一种准确而高效的仿真算法。

**关键词:** 合成孔径雷达; 雷达散射截面; 海面散射; 雷达回波; 合成孔径雷达成像

中图分类号: TP391; TN9571 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 01-0011-09  
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0694

## A Fast Simulation Method for Ship Target SAR Signal Echo

Yuan Fei<sup>1,3</sup>, Li Jianhong<sup>2</sup>, Yin Hao<sup>2</sup>, Wang Yuhao<sup>3</sup>, Hong Sheng<sup>3</sup>(1. Unikinfo LTD, Beijing 100095, China; 2. The Sixth Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China;  
3. Information Engineering School of Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In order to meet the application requirements of synthetic aperture radar (SAR) in ocean remote sensing, a fast simulation method for the ship target SAR echo generation is presented, which carries out the accurate electromagnetic modeling to the important ship targets. "Four paths" model is used to calculate the complex echo between the ship target and sea surface, and the facet model is used to model the sea surface backscattering. After the two parts of echoes being synthesized, the SAR echo of whole scene is gotten, and the echo is processed by spot SAR imaging processing algorithm to verify the effectiveness. The proposed fast method, avoids the complex electromagnetic simulation on the whole imaging area, effectively improves the electromagnetic calculation efficiency on big scene. By applying the high frequency electromagnetic algorithm in the target area, the electromagnetic scattering property of the ship target is retained, which provides an accurate and efficient simulation algorithm for the SAR echo simulation.

**Keywords:** synthetic aperture radar(SAR); radar-cross section; sea surface scattering; radar echo; SAR imaging

## 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)

是一种高分辨率微波成像雷达。它将合成孔径技术、脉冲压缩技术和数字信号处理技术有机地结合起来。通过发射大带宽信号或极窄脉冲信号提高距离

收稿日期: 2020-09-12 修回日期: 2021-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(62061030)

第一作者: 袁飞(1979-), 男, 博士, 高工, 研究方向为天线设计、电磁环境仿真和测试。E-mail: yuanfei@unikinfo.com

通讯作者: 洪升(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信、雷达信号处理。E-mail: shenghong@ncu.edu.cn

向分辨率, 利用合成孔径技术提高方位向分辨率, 从而获得大面积的高分辨率雷达图像。由于 SAR 技术可以全天候、全天时对海面静止和运动目标进行成像, 在海洋遥感领域具有巨大的作用<sup>[1]</sup>。合成孔径雷达系统利用了多普勒频率和电磁场散射信息来重建目标图像, 并且获得高分辨力, 但是研究目标在动态海面上的综合模型雷达图像, 会严重被海面散射点和物体自身的运动所影响<sup>[2]</sup>。在实测图像数据缺乏的条件下, 通过建模仿真方法, 实现海面舰船目标 SAR 图像的模拟, 对于海面 SAR 图像分析、海洋物理参数反演、舰船目标的检测与识别方法等工作具有重要的工程应用价值<sup>[1,3]</sup>。

目前对 SAR 成像的仿真方法主要有 2 类: 基于场景电磁散射特性的仿真方法和基于场景图像灰度特性的仿真方法<sup>[4]</sup>。基于场景电磁散射特性的仿真方法首先通过建立场景的三维电磁散射模型, 然后仿真场景中各点的散射特性, 利用雷达原理得到回波数据, 再通过成像处理方法仿真得到 SAR 图像。该方法考虑了雷达成像的物理过程, 同时能够反映系统的成像性能, 但是, 需要较大的建模和计算工作量; 基于场景图像灰度特性的仿真方法着眼于目标的几何模型及辐射模型, 并不考虑电磁波与目标的作用过程, 因此该方法仿真速度快, 能够有效仿真图像的纹理特性及辐射特性, 但该方法不能体现 SAR 系统的目标特征。对于海面舰船目标的 SAR 图像的应用, 需要综合考虑舰船目标在 SAR 系统下的成像特性和海面图像纹理及辐射特征<sup>[5]</sup>, 因此有必要综合 2 种需求, 对舰船目标采用基于电磁信号的仿真方法, 对海面采用基于图像的仿真方法, 合理应用 2 种方法, 在提高仿真速度的同时, 保证仿真精度。

海面舰船合成孔径雷达成像仿真向着更为成熟的阶段发展。一种新型的基于反 Omega-K 算法来进行海面的建模被提出, 这种算法相比以前算法运算效率更高。文献[6-8]给出了具体海面目标合成孔径雷达成像仿真结果, 这些结果反映出雷达成像受着海面起伏的影响。对此, 研究者将研究方向扩

展到更加复杂的目标。文献[9]研究了低空飞行目标受海面因素影响的雷达成像。本文按照 SAR 成像的核心机理<sup>[6-7]</sup>, 提出了一种快速产生海面舰船目标 SAR 回波的仿真方法。该方法通过随机粗糙面来等效海面仿真场景的物理模型, 其中随机粗糙海面模型通过“联合北海波浪计划”(joint north sea wave project, JONSWAP)海谱法产生, 舰船目标模型通过计算机辅助设(CAD)建模技术获取; 为了实现大场景海面的快速仿真, 对海面模型采用海面散射, 对舰船目标模型利用物理光学(physical optics, PO)法<sup>[10]</sup>, 并结合“四路径”模型计算舰船目标与海面的耦合散射, 从而减少对整个成像场景的散射模拟。这样, 可以有效降低对海面大场景的电磁计算开销, 同时, 还可以保持舰船目标散射特性的精细特征。

## 1 海面目标 SAR 回波信号建模

典型舰船目标 SAR 成像场景中, SAR 雷达接收到的回波信号由海面散射、舰船目标散射、海面与舰船耦合散射的回波共同构成。因此海面目标 SAR 回波  $E(t)$  可以表示为时变海背景的散射回波信号、舰船目标回波信号和海船耦合散射回波信号的叠加<sup>[11]</sup>:

$$E(t) = E_{\text{sea}}(t) + E_{\text{ship}}(t) + E_{\text{ship-sea}}(t) \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{sea}}(t)$  为入射波经过海面直接散射后的回波;  $E_{\text{ship}}(t)$  为入射波经过目标船体直接散射后的回波;  $E_{\text{ship-sea}}(t)$  为经过海面和船体相互作用的耦合散射回波。舰船目标的散射  $E_{\text{ship}}(t)$  以及舰船目标与海面的耦合散射  $E_{\text{ship-sea}}(t)$  都可以通过多径散射模型进行等效, 因此可以将  $E_{\text{ship}}(t)$  和  $E_{\text{ship-sea}}(t)$  统一用多径散射模型  $E'_{\text{ship}}(t)$  进行建模, 即  $E'_{\text{ship}}(t) = E_{\text{ship}}(t) + E_{\text{ship-sea}}(t)$ 。从而将 SAR 回波信号简化为海面背景回波  $E_{\text{sea}}(t)$  和舰船多径回波  $E'_{\text{ship}}(t)$ , 即可以通过分别计算海面的雷达散射回波和舰船目标的多径散射回波, 然后进行叠加得到复合场景下的海面舰船目标 SAR 回波:

$$E(t) = E_{\text{sea}}(t) + E'_{\text{ship}}(t) \quad (2)$$

得到 SAR 回波信号后, 即可应用 SAR 成像算法进行成像处理, 生成 SAR 图像, 完整的建模与仿真流程:

step 1: 参数定义。对 SAR 成像场景进行定义, 包括雷达、舰船的几何关系、发射信号波形、海况参数等;

step 2: 海面 SAR 回波信号模拟。构建二维起伏海面, 计算海面散射面元的散射系数, 生成海面各面元回波信号, 叠加合成总的海面散射回波;

step 3: 舰船 SAR 回波信号模拟。构建舰船电磁散射模型, 舰船与海面多径散射模型, 计算舰船多径散射回波;

step 4: 复合场景 SAR 信号模拟。通过对各回波信号的叠加, 合成海面 SAR 回波与舰船 SAR 回波;

step 5: 进行 SAR 成像处理, 验证 SAR 回波信号模型的正确性。

在以上的仿真流程中, 由于海面散射回波计算、舰船-海面复合散射回波计算以及最终的 SAR 成像计算都非常耗时, 因此本文在不损失计算精度的原则下, 通过选择合适的算法模型提高仿真效率, 具体包括:

step 1: 通过对海谱进行逆傅里叶变换提高动态海面的生成效率;

step 2: 通过高频“四路径”方法提高舰船-目标的散射回波的计算效率;

step 3: 通过频域 SAR 成像方法提高图像成像效率。

## 2 海面散射模型描述

### 2.1 海面起伏模型

对海面雷达回波信号仿真首先需要建立海面散射模型, 由于海表面在风和潮汐的作用下运动, 既有一定的规律性, 又有一定的随机性, 工程上主要通过海谱来描述海面的分布特性。海谱是海面的功率密度谱, 与海面高度起伏函数满足逆傅里叶变换关系, 海谱反映了海浪能量在波长和传播方向上

的统计分布, 常用的海谱模型有 PM(pierson moskowitz)海谱、JONSWAP 海谱、Fung 海谱、DV(durden vesecky)海谱、NRL(naval research laboratory)海谱等。本文采用较为成熟的 JONSWAP 海谱模型来生成随机起伏的海表面, 该模型采用一系列振幅、频率、相位和方向不同的正弦波线性叠加来模拟起伏海面。海面的生成则是通过对海谱进行逆傅里叶变换来完成, 其具体流程如图 1 所示。首先生成二维高斯白噪声序列并进行二维傅里叶变换, 叠加描述海面随时间连续变化的相位因子, 然后与选定的海谱相乘, 即在频域用海谱模型对其进行滤波, 最后对该结果进行二维逆傅里叶变换, 得到三维动态海面<sup>[7]</sup>。

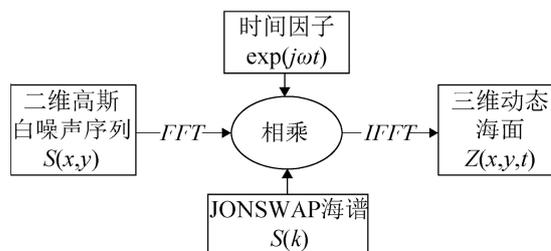


图 1 动态海面生成原理  
Fig. 1. Theory of dynamic sea surface

$$Z(x, y, t) = IFFT[U(k_x, k_y) \cdot S(k_x, k_y) \cdot \exp(j\omega(k_x, k_y)t)] \quad (3)$$

式中:  $U(k_x, k_y) = FFT[U(x, y)]$  为二维高斯白噪声序列的傅里叶变换;  $S(k_x, k_y)$  为二维海谱模型, 本文选取 JONSWAP 海谱作为海面反演模型;  $\exp(j\omega(k_x, k_y)t)$  为描述海面动态演进的时间相关因子;  $\omega(k_x, k_y)$  为描述海流沿着  $x$  和  $y$  方向传播的角速度。

$$S(k) = \frac{\alpha}{2k^4} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{k_p}{k}\right)^2 + \ln \gamma \cdot \exp\left(-\frac{(\sqrt{k} - \sqrt{k_p})^2}{2\sigma_p^2 k_p}\right)\right] \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为 Phillips 参数;  $k$  为波数;  $k_p$  为峰值波数;  $\gamma$  为谱峰升高因子, 是 JONSWAP 波谱密度的最大值与 PM 海谱密度的最大值之比, 用以反映在

有风条件下, JONSWAP 波谱相对 PM 海谱谱峰的升高;  $\sigma_p$  为谱峰形状参数。

$$\sigma_p = \begin{cases} 0.07, & k \leq k_p \\ 0.09, & k > k_p \end{cases} \quad (5)$$

图2为通过 JONSWAP 波谱模型进行逆傅里叶变换生成的典型海面模拟结果。

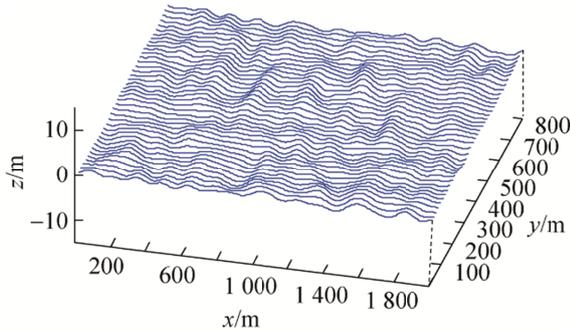


图2 海表面模拟

Fig. 2 Curve of simulated sea surface by JONSWAP model

## 2.2 海面散射模型

由于海面是随时间动态变化的, 因此即使雷达的所有参数固定不变, 海面的电磁散射也会体现时变特性。但由于海面的起伏变化远远小于雷达信号的变化频率, 因此对海面电磁散射仿真时, 可定义雷达的脉冲重复周期为仿真间隔即时间切片。每个时间切片上, 海面起伏特性呈现一张快照(snapshot), 海面的动态变化离散为各个时间切片的快照, 这样计算每一帧海面快照的电磁散射信号, 就可得到随雷达信号周期变化的海面回波信号。

对每一帧静态海面快照的电磁散射模拟, 可以用粗糙面散射模型进行等效, 其中双尺度模型是比较常用的二维粗糙面散射模型, 该模型是在综合了微扰法和基尔霍夫近似法的基础上发展起来的<sup>[5]</sup>, 它将粗糙海面等效为小尺度起伏、叠加在有一定起伏的大尺度粗糙面上, 其中大尺度粗糙面用基尔霍夫近似法来模拟, 小尺度起伏用微扰法模拟, 并用微扰法的一阶近似结果计算小尺度起伏的散射系数, 然后通过大尺度的斜率分布求平均作为最终的散射计算结果。

双尺度模型中的大尺度分量和小尺度分量分别对应海面对电磁波的2种后向散射机理: 大尺度对应镜面反射机理; 小尺度对应布拉格散射机理。因此, 分别计算大尺度波浪产生的镜面反射系数和小尺度波浪产生的布拉格散射系数, 进行叠加即可得到海面后向散射系数的双尺度模型计算结果。

大尺度波浪的镜面反射系数可表示为

$$\sigma_s^0 = \frac{\left| \frac{1-\sqrt{\epsilon}}{1+\sqrt{\epsilon}} \right|^2}{2 \cos^4 \theta \cdot S_u S_c} e^{-\frac{1}{2} \tan^2 \theta \left( \frac{\cos^2 \theta}{S_u^2} + \frac{\sin^2 \theta}{S_c^2} \right)} \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为海水的相对介电常数;  $\theta$  为电磁波的入射角;  $S_u$  和  $S_c$  分别是逆风方向斜率方差和侧风方向斜率方差。

小尺度波浪的 Bragg 散射系数可表示为

$$\sigma_B^0 = 8k^4 h^2 \cos^2 \theta |\alpha|^2 W(2k \sin \theta) \quad (7)$$

式中:  $k$  为空间波数;  $h$  为海面的均方根高度;  $\theta$  为入射角度;  $\alpha$  为相应的极化系数;  $W$  为  $\theta$  方向的海谱。针对水平和垂直极化形式,  $\alpha$  可分别表示为

$$\begin{cases} \alpha_{HH} = \frac{1-\epsilon}{(\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})^2} \\ \alpha_{VV} = \frac{(\epsilon - 1)^2 \sin^2 \theta + \epsilon^2 - \epsilon}{(\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\epsilon$  为海水的相对介电常数。

总的后向散射系数为镜面反射系数与布拉格散射系数之和, 即:

$$\sigma^0 = \sigma_s^0 + \sigma_B^0 \quad (9)$$

图3给出了3级海况(浪高1 m)和5级海况(浪高3 m), ( $S=3, 5$ )条件下, HH 和 VV 极化的海面后向散射系数随擦海角( $grazing\ angle = 90^\circ - \theta$ )变化的计算结果。

## 3 舰船散射模型

### 3.1 舰船目标特性计算

舰船等大型目标的散射特性通常用雷达散射截面(radar-cross section, RCS)来描述<sup>[12]</sup>, RCS 是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念, 是

在给定方向上返回或散射功率的一种度量。对目标 RCS 的计算, 通常是通过三维几何建模, 网格剖分, 然后调用电磁算法求解其电磁散射特性得到的, 其建模和仿真流程如图 4 所示。

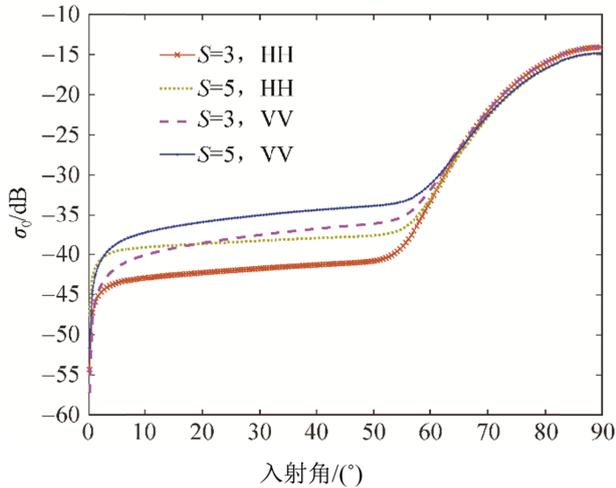


图 3 海面散射系数随入射角变化的曲线

Fig. 3 Curve of sea surface scattering coefficient changing with incident angle

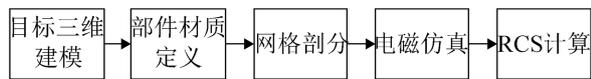
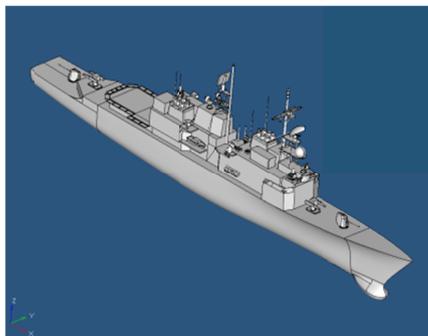


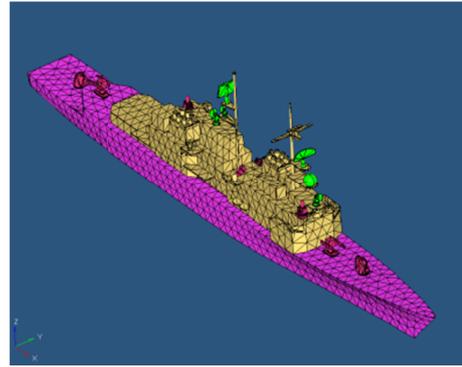
图 4 目标 RCS 计算的建模和仿真流程

Fig. 4 RCS modeling and simulation process

舰船目标的三维建模是依据实际舰船目标的三维尺寸, 采用曲面建模技术完成舰船的三维重建。首先, 利用目标的三视图定位外形尺寸, 然后运用自由曲面设计描绘线型结构, 并延展成曲面, 最后, 运用集合布尔运算, 将各个曲面模块组合为封闭模型。图 5 为某舰船目标的 3D 建模结果和网格剖分结果。



(a) CAD 模型



(b) 网格剖分模型

图 5 舰船目标模型

Fig. 5 Ship 3D model and mesh model

完成舰船的 3D 建模后, 对模型进行合理的网格剖分, 即用小面元来描述实际目标外形, 然后对其进行电磁散射计算, 求解 RCS。由于舰船目标属于超电大尺寸目标(物理尺寸超过 100 波长), 考虑到计算效率及计算精度的需求, 采用高频电磁计算方法更为合适。本文采用物理光学(PO)方法, 计算得到小面元的散射场, 利用物理绕射理论 (geometrical theory of diffraction, GTD) 计算边缘的绕射场, 最后把散射场表示为表面的物理光学贡献和边缘的绕射贡献之和。由于这种方法考虑了面元之间的遮挡效应, 可以自动计入目标各部件之间的电磁耦合, 因此计算精度较高, 是一种针对电大尺寸目标的快速求解算法。RCS 具体为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi R} \frac{\mathbf{E}_s \cdot \hat{\mathbf{r}}}{E_{in}} \quad (10)$$

式中:  $E_{in}$  为入射场;  $\hat{\mathbf{r}}$  为后向散射的单位矢量;  $\mathbf{E}_s$  为后向散射场, 可表示为

$$\mathbf{E}_s = -\frac{jk_e \eta_0 \exp(-jkr)}{4\pi r} \hat{\mathbf{r}} \cdot \int_{s'} 2(\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{H}_t) \cdot \hat{\mathbf{r}} \exp(jk\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}') dS' \quad (11)$$

图 6 是利用 PO 方法计算得到的舰船 RCS 数据随方位角 ( $\phi$ ) 变化的曲线。本算例中, 频率为 10 GHz, 俯仰角为  $0^\circ$ , 即计算的是舰船水平面的 RCS 分布。RCS 的尖峰值分别对应舰船强散射的方向, 如船头方向、船舷方向、船尾方向等。

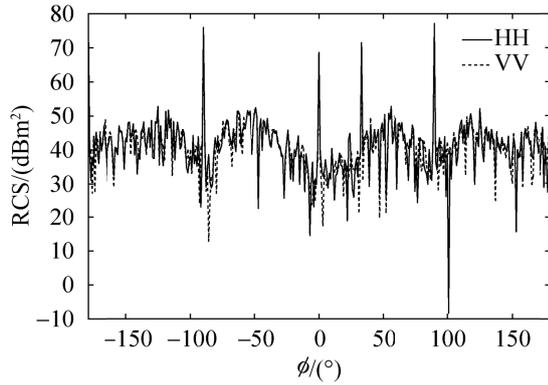


图6 舰船 RCS 计算结果  
Fig. 6 Calculation results of ship RCS

### 3.2 舰船-海面复合散射模型

由于海面的存在,舰船目标与海面之间的耦合作用使得舰船回波信号异常复杂,除了舰船本体的散射回波外,还必须考虑舰船与海面之间多次反射和散射耦合的问题<sup>[12]</sup>。该耦合效应可以通过“四路径”法<sup>[13]</sup>进行等效,即当雷达波以一定角度照射到海面上的舰船目标时,雷达接收天线能够收到的回波,除了来自目标本身的直接散射波外(如图 7(a)所示),还包括来自目标-海面间多径反射产生的回波,如图 7(b)~(d)所示的目标与海面的一次和二次反射效应。

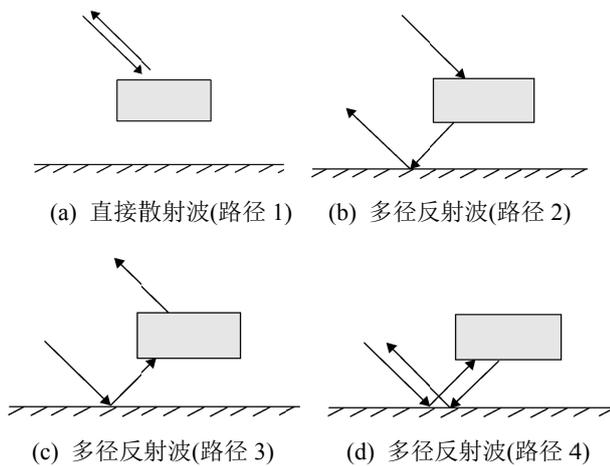


图7 回波信号“四路径”模型  
Fig. 7 Four path model for radar echo

图 7(a)中的路径 1( $L_1=2R$ )为目标对雷达波的直接散射回波,该路径上的电波散射传播路径为“雷达-目标-雷达”;图 7(b)中的路径 2( $L_2=R+R_1+R_2$ )

为“雷达-目标-海面-雷达”;图 7(c)中的路径 3( $L_3=R_2+R_1+R$ )为“雷达-海面-目标-雷达”;图 7(d)中的路径 4( $L_4=2R_2+2R_1$ )为“雷达-海面-目标-海面-雷达”。事实上,除了以上 4 种典型路径外,还存在更多的高次反射路径。但理论研究和实验观测结果表明,在目标与粗糙面的相互耦合作用中,更高次的海面反射路径对回波信号的贡献比较小,为了简化计算并提高仿真效率,通常忽略 3 次和更高次的多径反射回波影响<sup>[14-17]</sup>。这样,雷达接收到的舰船多径回波信号可以表示为来自 4 条回波路径的信号叠加,即

$$E'_{\text{ship}}(t) = E_1(t) + E_2(t) + E_3(t) + E_4(t) \quad (12)$$

其中  $E_1(t) = E_{01} \exp(-jkL_1)$ ;  $E_2(t) = \rho E_{02} \exp(-jkL_2)$ ;  $E_3(t) = \rho E_{03} \exp(-jkL_3)$ ;  $E_4(t) = \rho^2 E_{04} \exp(-jkL_4)$ 。分别表示上述 4 条路径的散射场。 $E_{01}$ ,  $E_{02}$ ,  $E_{03}$  和  $E_{04}$  分别为未考虑传播路径影响时的目标散射的复电场,可通过式(11)得到;  $\rho$  为海面对电磁波的反射系数,可以通过菲涅尔反射公式计算得到;  $\rho^2$  为经过 2 次反射。

为了验证本文方法的正确性和计算效率,图 8 给出了分别采用物理光学“四路径”法(本文方法)和精确数值方法(method of moment, MOM)得到的  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的海面上,边长为  $10 \text{ m}$  的立方体后向 RCS 计算结果。其中,入射电磁波的频率为  $10 \text{ GHz}$ ,海况为 3 级,海水的相对复介电常数为  $\varepsilon = 70 - j65$ 。采用 2 种方法的计算资源开销见表 1。

表 1 舰船-目标复合散射计算开销统计

Table 1 Cost statistics for ship-target combination scattering computation

方法	CPU	内存	耗时/min
本文方法	8 核	150 MB	<1
MOM	8 核	60 GB	20

从验证结果来看,采用本文方法与采用精确数值算法的计算结果在大多数角度上都具有较好的一致性,但采用本文方法显然从计算效率和资源开销上具有很大的工程应用价值,效率提高 20 倍以上。

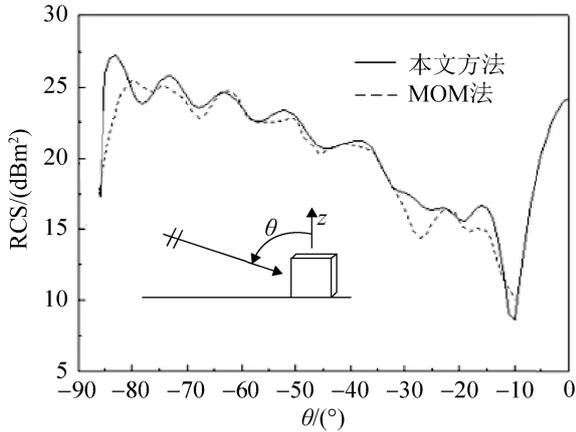


图 8 海面上立方体的后向场散射计算  
Fig. 8 Backscattering of a Cube Target on the sea

### 4 海面舰船目标 SAR 图像仿真

获取复合场景 SAR 信号后即可进行 SAR 图像的仿真。本文采用成像效率较高的频域相乘方法进行 SAR 图像生成, 具体流程如下: 首先将舰船目标的宽带 RCS 数据(球坐标下), 通过插值和坐标变换的方法映射到直角坐标下; 然后将海面的散射数据, 通过二维傅里叶变换映射到频谱回波域; 随后在频域对海面的回波和舰船目标的回波进行融合; 最后再利用频域成像算法获得海面舰船 SAR 图像。SAR 成像仿真流程如图 9 所示。

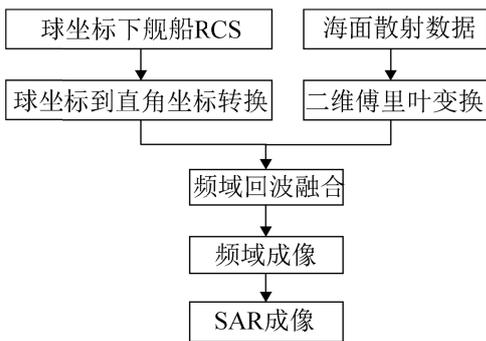


图 9 SAR 成像仿真流程  
Fig. 9 SAR imaging simulation process

### 5 仿真结果

为了验证本文方法的有效性, 进行了数值仿真。海面模型采用 JONSWAP 海谱来生成, 具体见式(3), 其中 Phillips 参数设为 0.007 5, 峰值波数设为 0.08, 谱峰升高因子为 3.5。舰船目标通过 CAD 软件建模,

如图 5 所示, 其中, 船体长 175 m, 船体宽 30 m。SAR 雷达的传感器的载频 9 GHz, 信号带宽 50 MHz, 脉冲宽度 20  $\mu$ s, 重复周期 100  $\mu$ s, 正侧视方式照射海面, 入射角 60°, 极化方式 VV, 平台运动速度 5 km/s, 合成孔径时间 0.8 s。海场景大小设置为 800 m $\times$ 800 m, 舰船航向南偏西 45°, SAR 图像仿真结果如图 10 所示。

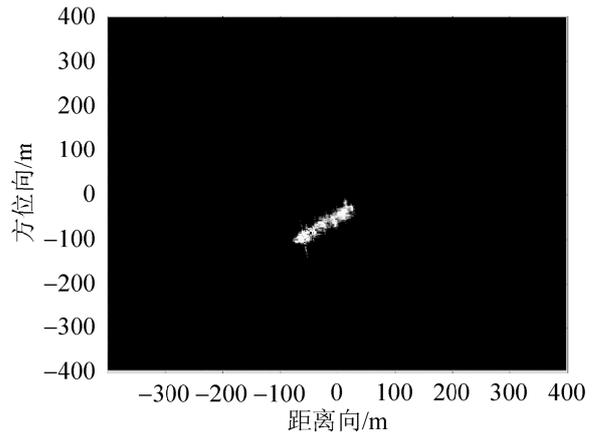


图 10 海面目标 SAR 图像仿真结果  
Fig. 10 Simulation results of SAR image of sea surface target

从仿真结果可以看出海面的纹理起伏信息, 体现出了海浪的空间相关性; 同时可以看出图像中舰船的轮廓, 存在散射点强弱的分布, 其中船体头部和尾部具有较强散射, 这主要是由于舰船头部和尾部的大块夹板的镜面反射, 产生较强的散射能量所致, 与电大目标的光学区的电磁散射特性相吻合。

在 HP Z840 工作站(8 核 64 线程, 128 GB 内存)进行仿真计算, 总耗时约 25 min, 其中大部分耗时主要集中在 SAR 回波信号的仿真计算, 包括舰船与海面复合的宽带回波信号计算耗时约 15 min, 动态海面的回波信号计算耗时约 3 min, 频域成像耗时约 5 min。针对本例 50 MHz 信号带宽, 800 m $\times$ 800 m 海面上的 175 m $\times$ 30 m 舰船目标进行 SAR 成像仿真(舰船的面元数约为 8 千万, 海面的面元数约为 60 亿), 采用全波算法和高效算法与采用本文算法的计算耗时如表 2 所示。

表 2 回波仿真计算耗时对比  
Table 2 Time consume for echo calculation / min

算法	目标-海面复合散射	海面散射	SAR 成像
本文算法	15	3	5
全波算法	360	1 320	20
高频算法	40	60	5

表 2 中的 3 种算法都采用 OpenMP 进行多核并行计算, 其中全波算法为多层快速多极子法, 耗时主要体现在对目标与海面的复合散射场计算和海面散射场计算。由于该算例是典型的超电大尺寸问题, 因此即使用具有很高加速效率的多层快速多极子算法, 仍然达到 1 700 min (约 28 h)。高频算法为物理光学法, 采用标准物理光学法求解目标-海面的复合散射场, 相比本文采用的四路径法, 需要迭代计算更多的多次反射, 耗时超 40 min; 计算海面散射时, 用物理光学法需要计算所有面元的电流积分得到后向散射场, 相对本文采用的基于面元散射系数的后向散射计算方法, 同样也耗时更多。此外进行 SAR 成像计算时, 本文算法和低频方法都采用了频域成像算法, 相对全波算法采用的时域回波成像算法, 也有将近 4 倍的效率提升。

通过以上几种算法用时的对比, 可以看出: 全波算法明显不适用于此类问题, 而即使都采用高频算法, 采用本文的仿真流程和方法, 可以快速提高海面目标 SAR 成像的仿真效率, 同时又能很好地保留目标的电磁散射特性。

## 6 结论

海面目标的 SAR 成像在海面目标检测与识别、海洋环境监测、国防军事等领域应用广泛, 研究舰船目标的海面 SAR 成像仿真技术, 具有重要的工程意义。本文针对传统采用电磁计算方法仿真速度慢的问题, 利用海谱理论对海面建模, 然后利用面元法快速求解海面的 RCS, 对于舰船目标的 RCS 采用高频电磁方法进行求解, 并利用四路径法求解舰船与海面的复合散射回波, 最后在频域对海面回波和舰船回波数据进行融合, 得到 SAR 回波信号,

通过对回波信号进行成像处理, 获得最终的舰船目标 SAR 图像。本文的方法通过工程等效, 简化大场景的电磁求解, 但对重点目标采用了高频电磁模型进行仿真, 这样在提升仿真速度的同时还能保证目标的重要细节信息, 对于海面舰船目标 SAR 成像研究具有非常经济的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 董庆, 郭华东. 合成孔径雷达海洋遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
Dong Qing, Guo Huadong. Synthetic Aperture Radar for Ocean Remote Sensing[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2005.
- [2] Rikka S, Pleskachevsky A, Uiboupin R, et al. Sea State in the Baltic Sea from Space-borne High-resolution Synthetic Aperture Radar Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing (S0143-1161), 2018, 39(4): 1256-1284.
- [3] 李宁, 张民, 王欣, 等. 船海复合场景面元化快速电磁建模方法及 SAR 成像仿真[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(4): 90-95.  
Li Ning, Zhang Min, Wang Xin, et al. Facet-based Rapid Electromagnetic Modeling and SAR Imaging for Composite Ship-Sea Scene[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(4): 90-95.
- [4] 王子晟, 海面运动舰船的雷达成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
Wang Zisheng. The Research on Radar Imaging Method for Ship on the Dynamic Ocean Surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [5] Chen H, Zhang M, Zhao Y W, et al. An Efficient Slope-deterministic Facet Model for SAR Imagery Simulation of Marine Scene[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (S0018-926X), 2010, 58(11): 3751-3756.
- [6] 许小剑, 李晓飞, 刁桂杰, 等. 时变海面雷达目标散射现象学模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 275-341.  
Xu Xiaojian, Li Xiaofei, Diao Guijie, et al. Radar Phenomenological Models for Ships on Time-evolving Sea Surface[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 275-341.
- [7] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Guo Lixin, Wang Rui, Wu Zhensen. Basic Theory and

- Method of Random Rough Surface Scattering[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2010.
- [8] Liu B, He Y. SAR Raw Data Simulation for Ocean Scenes Using Inverse Omega-K Algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2016, 54(10): 6151-6169.
- [9] Li X. SAR Imaging of Internal Gravity Waves: From Atmosphere to Ocean[C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth, USA, IEEE, 2017: 1499-1501.
- [10] Peng P, Guo L X, Tong C M. A SAR Imaging Simulator of a Low-flying Target Above Ocean Surface with Multipath Effect[C]//Signal Processing, Communications and Computing, 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC). Xiamen, China: IEEE, 2017: 1058-1062.
- [11] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar Target Character[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [12] Shtager E A. An Estimation of Sea Surface Influence on Radar Reflectivity of Ships[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1999, 47(10): 1623-1627.
- [13] Johnson J T. A Study of the Four-path Model for Scattering from an Object Above a Half Space[J]. Microwave Opt. Technol. Lett. (S0895-2477), 2001, 30(6): 130-134.
- [14] 王勇, 许小剑. 海上舰船目标的宽带雷达散射特征信号仿真[J]. 航空学报, 2009, 30(1): 337-342.  
Wang Yong, Xu Xiaojian. On Wideband Radar Signature Simulation of Ships Over Sea Surface[J] Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 337-342.
- [15] Jiang D, Xu X J, Li X F. Multi-path EM Scattering Calculation for Ships Over Time-varying Sea Surface [C]//IEEE 2010 Antennas and Propagation Society International Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2010: 21-24.
- [16] 刁桂杰, 许小剑, 倪虹, 等. 海面舰船目标 SAR 回波信号仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 1989-2007.  
Diao Guijie, Xu Xiaojian, Ni Hong, et al, Synthetic Aperture Radar Signal Simulation of Ships on Sea Surface[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1989-2007.
- [17] 陈勇, 董纯柱, 王超, 等. 基于 HPP/PO 的舰船与海面耦合散射快速算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 40(4): 589-592.  
Chen Yong, Dong Chunzhu, Wang Chao, et al. Fast Algorithm Based on HPP/PO for Calculating Coupling EM Scattering from Ship Over Sea Surface[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 40(4): 589-592.