



## 基于SBR算法的海面舰船尾迹SAR成像与GPU加速技术

贾浩文, 王思凡, 吴扬, 徐若锋, 李洪梅, 赵雷

### SAR imaging of ship wake on sea surface based on SBR algorithm and GPU acceleration technology

JIA Haowen, WANG Sifan, WU Yang, XU Ruofeng, LI Hongmei, and ZHAO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024257>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 海面转向舰船尾迹的电磁散射建模与SAR成像模拟

Electromagnetic scattering modeling and SAR image simulation of a turning ship wake on sea surface  
电波科学学报. 2025, 40(1): 124–131

#### 基于时域弹跳射线与BP算法的聚束SAR目标电磁成像快速仿真方法

A fast simulation method for spotlight SAR electromagnetic imaging using time domain SBR and BP algorithm  
电波科学学报. 2025, 40(1): 80–88

#### 基于天线方向图与近场SBR的海面舰船复合散射研究

Composite scattering from sea and ship based on antenna pattern and near field SBR  
电波科学学报. 2022, 37(1): 1–7

#### 逆合成孔径雷达三维成像综述

Review of inverse synthetic aperture radar 3D imaging  
电波科学学报. 2023, 38(5): 739–756, 779

#### 基于栅格投影的地基合成孔径雷达三维地形匹配俯仰角模糊处理方法

The 3D terrain matching of ground-based synthetic aperture radar method based on grid projection for processing the pitch angle ambiguity  
电波科学学报. 2021, 36(4): 571–578

#### 基于改进SBR技术的地面目标SAR图像快速生成技术

Efficient SAR image simulation for target on rough ground surface using the improved SBR technique  
电波科学学报. 2024, 39(2): 322–331



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 贾浩文, 王思凡, 吴扬, 等. 基于 SBR 算法的海面舰船尾迹 SAR 成像与 GPU 加速技术[J]. 电波科学学报, 2025, 40(3): 464-472. DOI: 10.12265/j.cjors.2024257

JIA H W, WANG S F, WU Y, et al. SAR imaging of ship wake on sea surface based on SBR algorithm and GPU acceleration technology[J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(3): 464-472. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024257

# 基于 SBR 算法的海面舰船尾迹 SAR 成像与 GPU 加速技术

贾浩文<sup>1</sup> 王思凡<sup>1</sup> 吴扬<sup>1</sup> 徐若锋<sup>1</sup> 李洪梅<sup>2</sup> 赵雷<sup>1\*</sup>

(1. 中国矿业大学, 徐州 221116; 2. 中国船舶集团有限公司第七一六研究所, 连云港 222061)

**摘要** 针对电大尺寸场景的电磁散射计算与合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像模拟问题, 基于 Kelvin 船行波和积分区域变换法实现了海面直行与转向舰船尾迹的几何建模, 并通过弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 算法求解了所建模型电磁散射特性。在此基础上, 通过距离频域相干叠加法将 SBR 算法电磁散射计算与 SAR 频域回波信号模型结合, 实现了 GPU 多核并行加速的后向投影 (back projection, BP) 成像算法, 并对回波信号进行了聚焦处理, 得到了不同极化条件下海面舰船尾迹 SAR 图像, 实现了电大尺寸复杂场景 SAR 图像的快速生成, 运算时间相较于 CPU 多核并行的 BP 算法有较大提升, 加速比达到了 431.4。且生成的 SAR 图像能够清晰地呈现尾迹轮廓以及海面风向纹理等细节信息, 具备较好的图像质量, 充分体现出 SBR 多次散射对 SAR 图像质量的贡献。研究结果可为海面舰船尾迹智能识别探测等应用提供理论支撑。

**关键词** 海面舰船尾迹; 弹跳射线 (SBR) 算法; 合成孔径雷达 (SAR) 成像; 后向投影 (BP)

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2025)03-0464-09

DOI 10.12265/j.cjors.2024257

## SAR imaging of ship wake on sea surface based on SBR algorithm and GPU acceleration technology

JIA Haowen<sup>1</sup> WANG Sifan<sup>1</sup> WU Yang<sup>1</sup> XU Ruofeng<sup>1</sup> LI Hongmei<sup>2</sup> ZHAO Lei<sup>1\*</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. The 716 Institute of CSSC, Lianyungang 222061, China)

**Abstract** Aiming at the problem of electromagnetic scattering calculation and synthetic aperture radar (SAR) imaging simulation of electrically large scenes, the geometric modeling of the wake of a straight and turning ship on the sea surface is realized based on the Kelvin ship wave and the integral domain transform method. The electromagnetic scattering characteristics of the built models are solved by using the SBR algorithm. On this basis, the shooting and bouncing ray (SBR) algorithm electromagnetic scattering calculation is combined with the SAR frequency domain echo signal model by the range-frequency domain coherent superposition method. The echo signal is focused by BP imaging algorithm based on GPU multi-core parallel acceleration, and then SAR images of ship wake on the sea surface under different polarization conditions are generated. As a result, the SAR image of electrically large complex scene can be quickly generated. The operation time is greatly improved compared with the single CPU multi-core parallel back projection (BP) algorithm, and the speedup reaches 431.4. The generated SAR image can clearly present the detail information such as the wake contour and the wind direction texture of the sea surface, and has good image quality. The

收稿日期: 2024-12-16

资助项目: 中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2025-00057, 2024-10942); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX25\_2845, KYCX24\_2767); 中国矿业大学研究生创新计划 (2025WLKXJ109, 2024WLKXJ092)

通信作者: 赵雷 E-mail: leizhao@cumt.edu.cn

contribution of SBR multiple scattering to SAR image quality is fully utilized. The research results can provide theoretical support for applications such as intelligent recognition and detection of ship wakes on the sea surface.

**Keywords** ship wake on sea surface; shooting and bouncing ray (SBR) algorithm; synthetic aperture radar (SAR) image; back projection (BP)

## 0 引言

海面舰船是海洋监测中的关键目标之一,其在航行过程中会在海面上形成明显的尾迹,而且尾迹长度和宽度通常远大于舰船本身。这些尾迹不仅更易被探测,还能提供丰富的信息,通过对尾迹特征的分析,可以推算出舰船的尺寸、航向和速度等重要参数。近年来,合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 技术的快速发展,为舰船监测提供了强大的工具。SAR 具有全天时、全天候工作的能力,以及远距离探测的优势<sup>[1]</sup>,使其在星载或机载平台上能够高效捕捉海洋环境中运动舰船的细节。这种技术手段已经成为海上目标监测和态势感知的重要支撑,不仅提升了舰船探测的精度,还为海洋安全与资源管理提供了技术保障<sup>[2-4]</sup>。

在舰船尾迹建模领域,最早的公开研究是 Thomson 在 1887 年提出的单点源扰动模型<sup>[5]</sup>,即水面经单点源扰动产生尾迹波纹,并给出了扩散波和横断波的波形代数方程。在该模型提出后,众多学者纷纷投入对舰船尾迹建模的研究。其中 Oumansou 等考虑了水的粘性影响,将舰船首尾作为分离的点源,并建立了包含粘性系数的舰船尾迹波高数学模型<sup>[6]</sup>。尾迹的数学模型建立后,基于该模型求得舰船尾迹的电磁散射特性这一研究具有重要的意义。

众多研究人员开始关注对海面舰船尾迹进行电磁散射建模的问题,SAR 图像舰船尾迹目标识别问题逐渐成为相关领域研究热点。海面舰船尾迹模型通常属于电大尺寸场景,传统的数值模拟方法虽然计算精度较高,但存在巨大的计算量和内存占用,不太适合求解二维电大尺寸场景的电磁散射问题。为了提升海面舰船尾迹模型的电磁散射计算效率,西安电子科技大学吴振森团队采用物理光学 (physical optics, PO) 法,计算了不同入射条件下的单站和双站雷达散射截面 (radar cross section, RCS),实现了海面舰船尾迹电磁散射的仿真<sup>[7]</sup>。在此基础上,弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 法是一种将射线追踪的思想与 PO 积分结合的算法,比 PO 法更适合处理复杂目标及场景问题<sup>[8]</sup>。Jeng 等<sup>[9]</sup>利用物理绕射理论与 SBR 结合的方法实现了复杂海面及舰船目标

的电磁散射建模。复旦大学徐丰和金亚秋提出双向解析射线追踪法<sup>[10]</sup>,并利用该方法计算了粗糙面与电大尺寸目标的复合电磁散射特性。然而,相较于电磁散射的 RCS 及回波特性,SAR 图像能够更加直观地体现出复杂目标或场景的几何信息。

将复杂场景的电磁散射特性与 SAR 成像技术结合,即可实现针对复杂场景的 SAR 成像仿真。两种理论的结合方法非常关键,一种常见方法是基于速度聚束 (velocity bunching, VB) 模型结合场景的散射系数空间分布,能够直接获得复杂场景的 SAR 图像强度分布<sup>[2,11]</sup>。然而该方法在处理过程中没有涉及对雷达回波应用成像算法进行聚焦处理,因此存在一定的局限性。另一种结合方法是将 SAR 回波信号作为连接枢纽,该方法的处理过程及仿真结果具有明确的物理意义<sup>[12-14]</sup>。基于回波 SAR 成像仿真生成的结果与环境参数、雷达平台参数等表征参数密切相关,能够解释散射现象随不同参数变化的规律,以及揭示散射背后的物理机制<sup>[15-16]</sup>。

为了对 SAR 原始回波信号进行聚焦处理,研究人员提出了多种成像算法,其中频域成像算法往往依赖于对雷达和目标距离历程的建模,然而雷达运动轨迹多变,使得该类算法具有一定的局限性。相比之下,由计算机层析领域引入的后向投影 (back projection, BP) 算法,不仅摆脱了频域算法的局限,还具备了较高的成像精度<sup>[17]</sup>。虽然该算法具有诸多优点,但其较高的计算复杂度导致成像效率下降,因此针对该算法的加速策略备受学者关注。Zhang 等提出一种加速快速 BP (accelerated fast BP, AFBP) 算法,其能够有效提升 BP 算法的聚焦效率<sup>[18]</sup>。此外,随着计算机硬件平台的不断进步,GPU 多核并行加速的 BP 算法能够极大地提升计算效率。

本文从海面舰船尾迹几何建模出发,构建了舰船在直行与转向状态下的尾迹模型,基于 SBR 算法实现了对所建几何模型的电磁散射建模,并通过距离频域脉冲相干法生成了 SAR 回波信号。在此基础上,实现了 GPU 多核并行加速的 BP 成像算法聚焦处理,高效生成了不同极化条件下的海面舰船尾迹 SAR 图像。图像中清晰地展现了舰船尾迹及海面风向波的轮廓特征,充分体现出 SBR 多次散射对 SAR 图像质量的贡献。

## 1 海面与转向舰船尾迹的复合模型

### 1.1 Kelvin尾迹建模

1887年, Thomson通过点源扰动模型研究了舰船在水面运动时形成的波纹现象及其尾迹特征。假设舰船朝向  $x$  轴负方向以速度  $V_s$  匀速运动, 舰船尾端产生的自由波会沿着与  $x$  轴正方向夹角  $\theta$  的各个角度进行传播, 可以通过叠加所有平面波实现 Kelvin 尾迹波高的建立<sup>[2]</sup>。Kelvin 尾迹波高可以表示为

$$\zeta_{\text{ship}}(x, y) = \text{Re} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} F(\theta) \exp(-jk_0 \sec^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)) d\theta \quad (1)$$

式中:  $k_0 = g/V_s^2$ ;  $F(\theta)$  为船只的自由波谱, 是用来表示船体特征参数的函数。对于 Wigley 抛物型船体,  $F(\theta)$  的解析表达式为

$$F(\theta) = j(1 - \exp(-kd \sec^2 \theta)) \frac{8b}{\pi k^2 l^2} (kl \cos(kl \sec \theta) - \cos \theta \sin(kl \sec \theta)) \quad (2)$$

式中:  $d$  为吃水深度;  $b$  为半船宽;  $l$  为半船长。若考虑水的粘性及船体长度对尾迹的影响, 可将积分分为船首和船尾两部分。此时, 船首和船尾可分别视为独立扰动源, 故 Kelvin 尾迹可分解为船首波和船尾波:

$$\zeta_{\text{ship}}(x, y) = \zeta_{\text{ship}_f}(x, y) + C_{\text{vic}} \zeta_{\text{ship}_b}(x - 2l, y) \quad (3)$$

根据式 (3) 中的水粘性系数  $C_{\text{vic}}$  进行船头波与船尾波的叠加, 通常  $C_{\text{vic}}$  的取值为 0.6。叠加后的 Kelvin 尾迹示意图如图 1 所示。

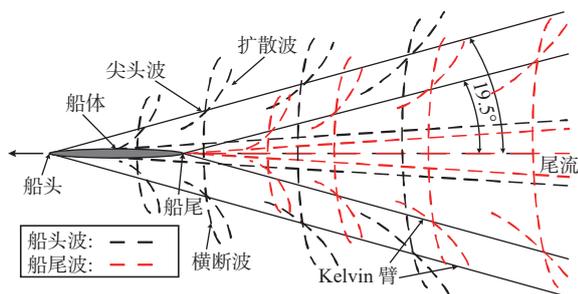


图1 Kelvin尾迹示意图

Fig. 1 Schematic of the Kelvin wake

假设舰船的半船长  $l$  为 30 m, 半船宽  $b$  为 5 m, 吃水深度  $d$  为 9 m, 船速  $V_s = 7$  m/s, 按照式 (3) 进行尾迹波高的建立。图 2 为考虑水的粘性及船体长度影响时的 Kelvin 尾迹波高图。

当舰船从直行状态进入到转弯状态时, 其尾迹形状会发生变化, Kelvin 臂从两条直线变成曲线, 且整个尾迹的形状不再对称。此时舰船产生尾迹的半

解析模型不再容易获取, 需要借助计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 进行数值模拟, 然而该方法需要极大的计算内存和很长的计算时间。本文基于积分区域变换法<sup>[19]</sup>实现转向舰船尾迹的几何建模, 积分区域变换公式如下:

$$\begin{cases} x_\alpha = x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ y_\alpha = x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

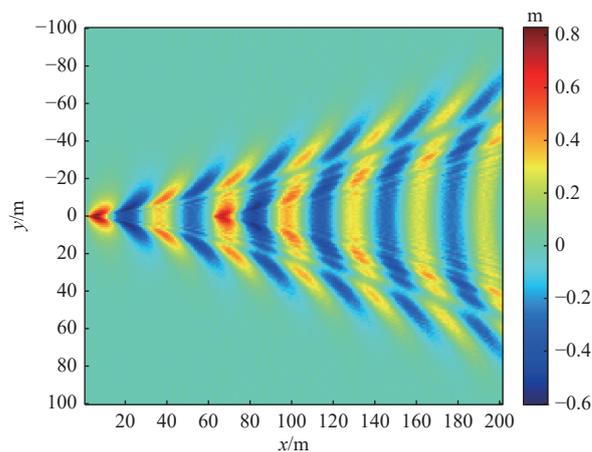


图2 Kelvin尾迹波高

Fig. 2 Kelvin wake wave height

将式 (4) 代入式 (1), 可以实现将直行尾迹旋转  $\alpha$  度的效果。在此基础上, 将角度变化范围  $\alpha$  设定为  $[\alpha_1, \alpha_2]$ ,  $\alpha_1$  表示尾迹尾部方向,  $\alpha_2$  表示尾迹尖端方向。将角度范围均分为  $N$  份, 形成一个由角度组成的等差数列。再将这些角度依次代入式 (4) 中, 从而生成具有转弯效果的尾迹。令  $\alpha_1 = 180^\circ$ 、 $\alpha_2 = 135^\circ$ , 船速为 7 m/s 时, 生成的转向尾迹如图 3 所示。图中舰船尾迹的尾端方向为  $180^\circ$  (正东方向为  $0^\circ$ , 逆时针旋转为正方向), 舰船尾迹尖端方向为  $135^\circ$ , 与设定的参数完全一致。

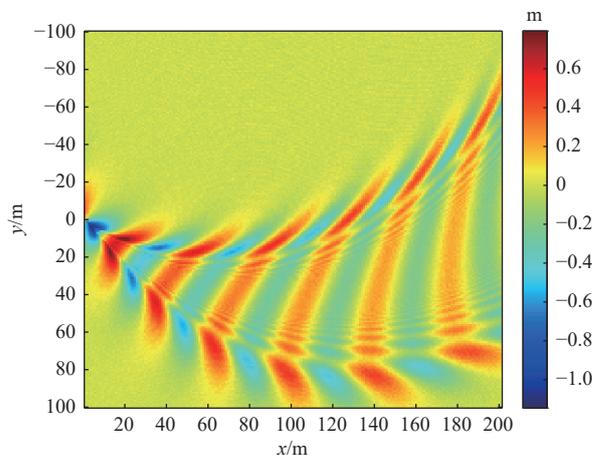


图3 转向舰船尾迹波高

Fig. 3 A turning ship wake wave height

## 1.2 线性海面建模

本文采用 Elfouhaily 等<sup>[20]</sup>提出的海谱模型对海面进行建模,其一维谱可表示为

$$S_E(k) = k^{-3}(B_L(k) + B_H(k)) \quad (5)$$

式中:  $k$  为海面波数;  $B_L$  和  $B_H$  分别为长波曲率谱和短波曲率谱。海浪谱的各向异性特征可以通过引入角分布函数描述,方向函数反映了海浪的方向特征以及不同频率成分的能量变化与海面上方风向的关系。

Elfohaily 等<sup>[20]</sup>还给出了一种更为实际的方向谱函数,它依赖于海浪波空间波数、海面风速以及风域,表达式为

$$\Phi_E(k, \varphi) = \frac{1}{2\pi} (1 + \Delta(k) \cos(2(\varphi - \varphi_w))) \quad (6)$$

式中:  $\Delta(k)$  为侧逆风比例因子;  $\varphi_w$  为风向角。

将无风向分量  $S_E(k)$  与角分布函数  $\Phi_E(k, \varphi)$  相乘,得到 Elfouhaily 组合海谱。对于二维平面空间,使用波矢量  $\mathbf{k} = [k_x, k_y]$ , 可得到用于描述不同风向角下的二维 Elfouhaily 组合海谱  $S(\mathbf{k}, \varphi)$ :

$$S(\mathbf{k}, \varphi) = \frac{1}{k} S_E(\mathbf{k}) \cdot \Phi_E(\mathbf{k}, \varphi) \quad (7)$$

假设风向角  $\varphi_w = 45^\circ$ , 建立的 Elfouhaily 二维组合海谱如图 4 所示。可以看出,海谱能量具有明显的角度分布特性。当风向角  $\varphi_w$  发生变化时,二维组合谱的分布角度也随之改变,并且其变化趋势与风向角保持一致。因此,Elfohaily 二维组合谱能够有效反映不同风向条件下的二维海谱能量分布特性。

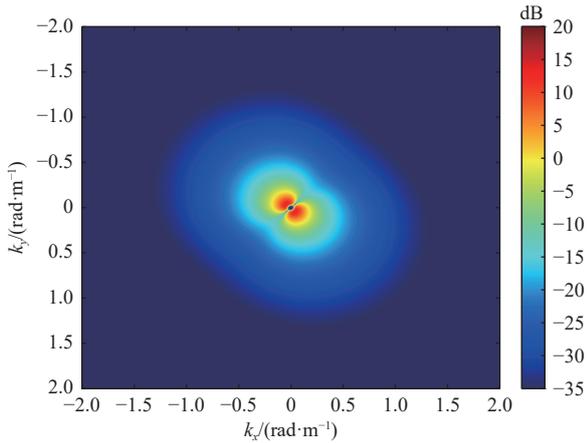


图 4 45° 风向下的 Elfouhaily 二维组合海谱  
Fig. 4 Elfouhaily 2D combined sea spectrum at 45° wind direction

在此基础上,利用线性滤波法,对满足共轭对称的复频域白噪声进行逆快速傅里叶变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT),能够快速得到海面的高程信息。线性滤波法中二维海面的任意一点  $\mathbf{r} = (x, y)$  于  $t$  时刻的高程分布为

$$Z(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}} A(\mathbf{k}, t) \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \text{IFFT}(A(\mathbf{k}, t)) \quad (8)$$

$$A(\mathbf{k}, t) = \gamma(\mathbf{k}) \sqrt{S(\mathbf{k}, \varphi) \Delta k_x \Delta k_y / 2} \exp(-j\omega t) + \gamma^*(\mathbf{k}) \sqrt{S(-\mathbf{k}, \varphi) \Delta k_x \Delta k_y / 2} \exp(-j\omega t) \quad (9)$$

式中:  $\gamma(\mathbf{k})$  为对应于  $\mathbf{k}$  的标准正态分布复高斯白噪声序列;  $\Delta k_x$  和  $\Delta k_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的空间采样频率间隔;  $\omega$  为角频率。

海面仿真参数设置如下:海面长度  $L_x$  和宽度  $L_y$  均为 200 m,海面离散间隔  $\Delta x$  和  $\Delta y$  均为 0.5 m。设置风速  $U_{10}$  为 3 m/s、风向角  $\varphi_w$  为  $135^\circ$ , 以及风速  $U_{10}$  为 5 m/s、风向角  $\varphi_w$  为  $45^\circ$  时,使用线性滤波法生成的 Elfouhaily 二维海面波高如图 5(a) 和 5(b) 所示。

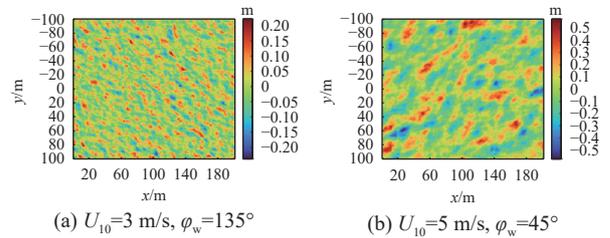


图 5 不同风速、风向条件下的海面波高

Fig. 5 Sea surface wave height under different wind speed and direction conditions

## 1.3 海面与舰船尾迹复合模型

真实的舰船尾迹会和波浪耦合在一起,将海面自由波高与 Kelvin 尾迹波高进行线性叠加,可近似获得海面和舰船尾迹的复合模型,如图 6 所示。图 6(a) 与 (b) 为海面背景下的直行舰船尾迹复合波高,图 6(c) 与 (d) 为海面背景下的转向舰船尾迹复合波高。当海面风速  $U_{10}$  为 3 m/s、风向角  $\varphi_w$  为  $135^\circ$  时,生成的海面舰船复合模型如图 6(a) 和 (c) 所示;当风速  $U_{10}$  为 5 m/s、风向角  $\varphi_w$  为  $45^\circ$  时,生成的海面舰船复合模型如图 6(b) 和 (d) 所示。

为了验证仿真模型的有效性,本文对舰船和水面建模,并基于 CFD 仿真软件进行数值模拟,如图 7 所示。图 7(a) 为通过 CFD 仿真得到的直行舰船尾迹波高,其尾迹方向与图 2 基本一致,且二者尾迹结构与纹理非常相似。图 7(b) 为通过 CFD 仿真得到的转向舰船尾迹波高,与图 3 进行对比,两条弯曲 Kelvin 臂的弧度和扩散波的角度非常相似。此外,采用余弦相似度  $C$  对不同算法生成尾迹之间的相似度进行数值评估,余弦相似度  $C$  可以表示为

$$C(f_1, f_2) = \frac{f_1^T \cdot f_2}{\|f_1\|_2 \|f_2\|_2} \quad (10)$$

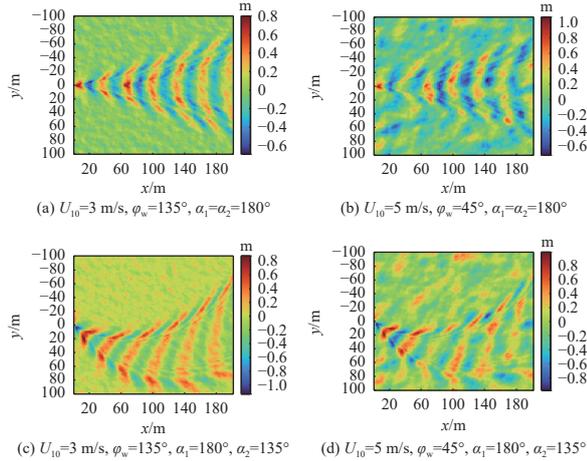


图6 不同风速、风向条件下海面舰船尾迹复合模型

Fig. 6 The composite model of ship wake on sea surface with different wind speeds and directions

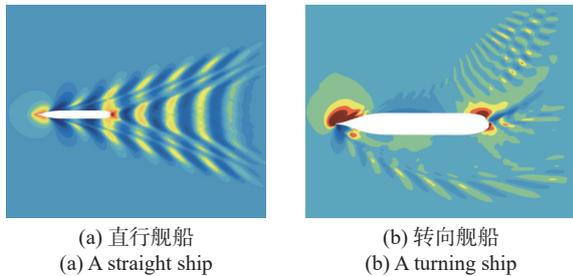


图7 舰船尾迹波高 CFD 仿真

Fig. 7 CFD simulation of ship wakes wave height

式中: 向量  $f_1$  与  $f_2$  分别为需要对比的两种模型, 余弦相似度  $C$  越接近 1, 表示二者的相似度越高。Kelvin 转向舰船尾迹相似度  $C$  为 0.874 3, CFD 转向舰船尾迹相似度  $C$  为 0.822 4, 两种方法生成的舰船尾迹模型具有较高的相似度, 验证了本文舰船尾迹模型建立的有效性。但由于 CFD 方法是迭代收敛, 需要花费较大的计算资源和较长的计算时间。而通过近似方法获得尾迹波高的计算成本极低, 且能获得较为相似的计算结果, 在效率上具有一定的优势。

## 2 基于 SBR 算法的 SAR 快速成像模型

### 2.1 SBR 算法电磁散射求解

SBR 算法结合了几何光学 (geometrical optics, GO) 和 PO 的优势, 为复杂电大尺寸目标的电磁散射特性计算提供了一种高效的方法。具体而言, SBR 算法利用 GO 对目标的遮挡效应和多次散射路径进行快速、精确的追踪, 从而有效地简化了结构复杂目标的散射分析问题。根据 GO 原理, 在射线入射方向  $k_i$  和面元法向量  $n$  已知的情况下, 射线反射方向  $k_s$  可以表示为

$$k_s = k_i - 2(k_i \cdot n)n \quad (11)$$

射线在每次反射的过程中, 场强和相位会不断地发生变化, 射线每次反射场强变换关系如下:

$$E(r_{n+1}) = \zeta \bar{\Gamma} E(r_n) e^{-jk_r} \quad (12)$$

式中:  $r_n$  和  $r_{n+1}$  分别为第  $n$  次和第  $n+1$  次射线的反射点向量;  $r = |r_{n+1} - r_n|$  为反射射线的传播距离;  $\zeta$  为射线的扩散系数;  $\bar{\Gamma}$  为目标表面反射系数。通过 Möller-Trumbore 算法<sup>[21]</sup> 计算射线和面元的交点, 再利用 PO 法计算交点的远区散射场。PO 法的理论基础是 Stratton Chu 积分方程, 将无源目标的电磁散射问题视为由入射波在目标表面引发的感应电流的辐射问题。目标面元  $a$  远区散射场可以表示为

$$E^{PO}(r_a) = \frac{jk \exp(-jkR)}{4\pi R} k_s \times (Zk_s \times (n \times H)) \int \exp(jk(k_s - k_i) \cdot r_a) ds \quad (13)$$

式中:  $k$  为电磁波波数;  $R$  为散射矢量的模;  $Z$  为空间波阻抗;  $H$  为磁场强度;  $r_a$  为射线出射点到面元  $a$  的矢量; 积分项  $\int \exp(jk(k_s - k_i) \cdot r_a) ds$  使用 Gordon 围线积分法进行求解。然后, 对每条射线管的 RCS 进行计算, 表达式为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (14)$$

最后进行求和可得到目标总 RCS。

### 2.2 基于 SBR 算法的 SAR 回波信号生成

由于聚束 SAR 的工作方式与宽频带下的方位角扫描电磁散射算法非常契合, 因此可以将二者结合生成 SAR 回波信号, 图 8 为聚束 SAR 工作模式示意图, 雷达波束中心方向始终朝向目标场景中心。利用距离频域脉冲相干法将所有散射点的散射回波进行相干叠加得到 SAR 频域回波信号, 基于 SBR 算法生成频域 SAR 回波信号的流程图如图 9 所示。通过计算复杂场景几何模型与雷达的位置关系, 得到入射角和方位角的扫描参数, 再根据雷达中心频率和带宽得到频率扫描参数。角度和频率扫描参数用于部署 SBR 算法对复杂场景进行电磁散射计算, 最后输入计算得到的频域后向散射系数生成 SAR 频域回波信号。

SAR 频域回波模型可以表示为

$$S_r(f, t_m) \approx \sum_{i=1}^N \sigma_i(f, t_m) W_r(f) \frac{B}{\sqrt{k_r}} \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{k_r}\right) \exp\left(j\frac{\pi}{4}\right) \exp\left(-j\pi \frac{4R_i(t_m)}{c} f\right) \exp\left(-j\pi \frac{4R_i(t_m)}{\lambda}\right) \quad (15)$$

式中:  $f$  为快时间频率;  $t_m$  为慢时间变量;  $\sigma_i(f, t_m)$  为第

$i$ 个面元在慢时间  $t_m$  的频域后向散射系数;  $R_i(t_m)$  为  $t_m$  时刻雷达与面元  $i$  之间的距离;  $c$  为光速。频域后向散射系数  $\sigma_i(f, t_m)$  可由上述 SBR 算法计算得到, 再使用频域脉冲相干法实现 SAR 频域回波信号模拟。

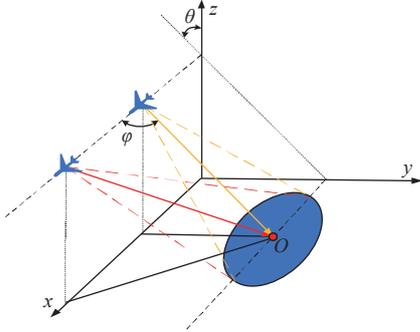


图 8 聚束 SAR 工作模式示意图

Fig. 8 Schematic of the spotlight SAR operating mode

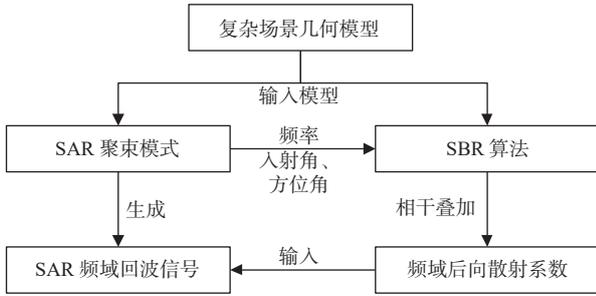


图 9 SAR 频域回波信号生成流程图

Fig. 9 Flowchart of SAR raw signal generation in frequency domain

### 2.3 BP 成像算法的 GPU 并行加速

在得到 SAR 回波信号后, 需要对该信号进行聚焦处理生成 SAR 图像。为了追求 SAR 图像的质量, 选用成像精度较高的 BP 算法。设置目标场景中心为参考点, 距离压缩后的频域信号可以表达为

$$S_{rc}(f, t_m) = \sigma_i(f, t_m) \exp\left(-j \frac{4\pi f \Delta R(x, y)}{c}\right) df \quad (16)$$

式中,  $\Delta R(x, y)$  为雷达到目标点  $(x, y)$  的斜距与雷达到场景中心的差值。将时延序列与回波信号进行 IFFT, 可以求得每个网格点对应的时域表达式

$$s(x, y) = \int S(f, t_m) \exp\left(\frac{j4\pi f \Delta R(x, y)}{c}\right) df \\ = \sum_{i=1}^n S(f_i, t_m) \exp\left(\frac{j4\pi f_i \Delta R(x, y)}{c}\right) \Delta f \quad (17)$$

式中:  $\{f_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  为快时间频率;  $\Delta f$  为频率采样间隔。找出不同方位时刻对应的回波信号进行相干累加, 通过 BP 算法聚焦后的 SAR 图像可以表达为

$$I(x, y) = \sum_{u=1}^U s(x, y, t_{m,u}) \quad (18)$$

BP 算法成像精度高, 但计算复杂度也极高, 尤其在进行大规模数据处理时, 对计算资源的需求十分苛刻, 因此采用 GPU 进行并行加速成为一种有效的解决方案。由于 BP 计算在整个 BP 算法中耗时最长, 且对于图像空间中每一个像素点的处理过程都是相同且独立的, 因此按照像素点进行 GPU 并行计算可以有效提升 BP 算法的运行效率。在该并行框架中, 每个 GPU 线程负责一个图像像素点的全部计算任务。具体而言, 线程首先依据雷达平台的方位计算像素点与雷达之间的空间距离, 并根据该距离确定信号的传播时延, 再从距离压缩和插值后的回波数据中提取与传播时延对应的回波信号。为消除传播过程中的相位偏移, 每个线程对提取的回波信号进行相位补偿。最后, 将相位补偿后的回波数据累加到该像素点的存储单元中, 更新图像矩阵。BP 算法的 GPU 并行实现流程如图 10 所示。

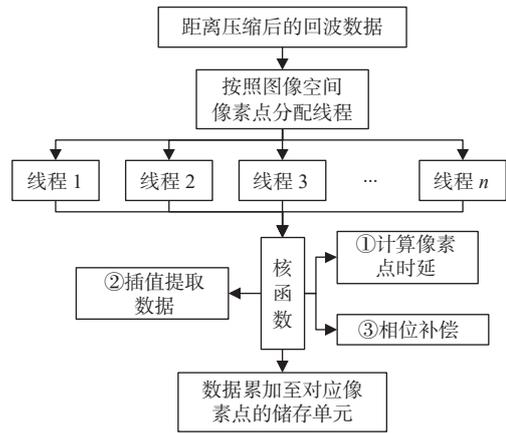


图 10 BP 算法的 GPU 并行实现流程图

Fig. 10 Flowchart of GPU parallel implementation of BP algorithm

## 3 结果分析与加速效率计算

### 3.1 海面舰船尾迹 SAR 成像参数设置与结果分析

本文针对海面直行、转向舰船尾迹模型进行 SAR 成像仿真, 通过 SBR 算法计算复杂几何场景电磁散射系数, 再使用距离频域脉冲相干法生成 SAR 频域回波信号, 最后利用上述基于 GPU 加速的 BP 算法对回波信号进行聚焦处理。在仿真过程中需要对 SAR 平台系统参数进行设置, 仿真使用的 SAR 平台系统参数如表 1 所示。

根据表 1 参数部署 SAR 以聚束模式进行仿真, 设置雷达入射角为  $60^\circ$ , 方位向扫角范围为  $[45^\circ, 135^\circ]$ 。根据雷达中心频率和带宽将最大频率  $f_{\max}$  设为 4 300 MHz, 最小频率  $f_{\min}$  设置为 3 700 MHz, 频率间隔  $\Delta f$  设

置为 3 MHz。将扫频范围与扫角范围用于部署 SBR 算法, 针对海面直行和转向舰船尾迹几何模型进行电磁散射系数的计算。通过距离频域脉冲相干法生成 SAR 回波信号, 再对回波信号使用 BP 算法进行聚焦处理。

表 1 SAR 平台系统参数

Tab. 1 Parameters of SAR platform

参数名称	取值
带宽	600 MHz
雷达采样率	720 MHz
脉冲重复频率	4 000 Hz
雷达中心频率	4 GHz
脉冲宽度	20 ms
距离向调频率	30 000 GHz/s
平台速度	50 m/s
平台高度	3 464 m

针对不同海面条件的舰船尾迹复合模型, 生成 HH、VV 极化下海面舰船尾迹 SAR 图像, 如图 11 所示。将图 11 SAR 聚焦图像与图 6 海面舰船尾迹复合模型进行对比, 可以发现仿真 SAR 图像能够清晰地表现出海面舰船尾迹的几何特征。通过对比图 11 (a)、(b) 与图 11 (c)、(d), 可以发现在同种极化方式下, 高的海面风速  $U_{10}$  会使 SAR 图像中海面纹理更加明显, 而低的海面风速  $U_{10}$  会使舰船尾迹的轮廓更加清晰。这是由于在低风速时, 海面较平静, 背景海杂波较弱, 尾迹与周围海面的对比度更高, 因此轮廓更清晰; 相反, 高风速时, 较强的海杂波会掩盖舰船尾迹的部分散射信息。通过对比图 11 (c)、(d) 与图 11 (e)、(f), 可以发现在设置相同海面风速及风向条件时, 相较 VV 极化, HH 极化情况生成的聚焦 SAR 图像整体偏暗。这一现象符合物理事实, 在海况等级较低时, 电磁波以镜面反射为主, HH 极化因水平振动方向与海面平行, 反射能量更易偏离雷达接收方向, 导致回波弱; 而 VV 极化因垂直振动方向与海面法线方向接近, 会保留更多回波能量。

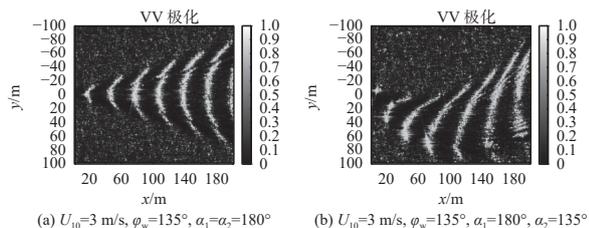
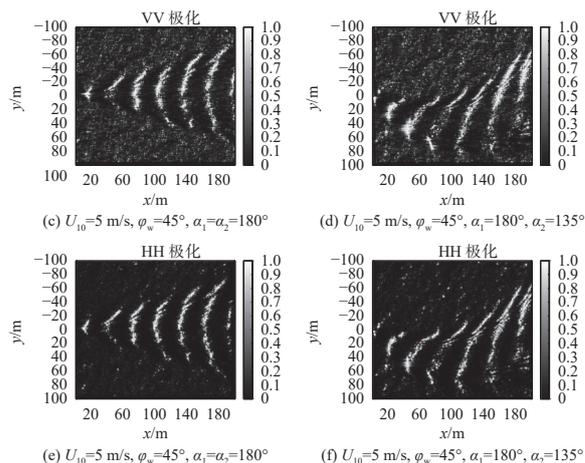
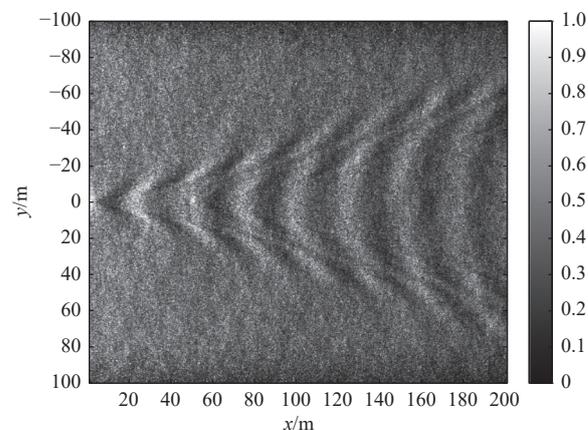
(a)  $U_{10}=3$  m/s,  $\phi_w=135^\circ$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=180^\circ$ (b)  $U_{10}=3$  m/s,  $\phi_w=135^\circ$ ,  $\alpha_1=180^\circ$ ,  $\alpha_2=135^\circ$ (c)  $U_{10}=5$  m/s,  $\phi_w=45^\circ$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=180^\circ$ (d)  $U_{10}=5$  m/s,  $\phi_w=45^\circ$ ,  $\alpha_1=180^\circ$ ,  $\alpha_2=135^\circ$ (e)  $U_{10}=5$  m/s,  $\phi_w=45^\circ$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=180^\circ$ (f)  $U_{10}=5$  m/s,  $\phi_w=45^\circ$ ,  $\alpha_1=180^\circ$ ,  $\alpha_2=135^\circ$ 

图 11 不同极化方式、风速和风向条件下海面舰船尾迹的 SAR 聚焦图像

Fig. 11 SAR focused images of ship wakes on sea surface under different polarization modes, wind speeds and wind directions

此外, 文献 [14] 中基于面元双尺度法的 SAR 回波仿真方法, 其控制极化方式、海面风速、风向与图 11 (c) 一致, 得到海面舰船尾迹仿真 SAR 图像如图 12 所示, 二者均能表现出舰船尾迹的几何特征, 但本文方法能够将尾迹轮廓和海面纹理呈现得更加清晰。

采用等效视数和辐射分辨率对两张 SAR 图像的质量进行数值评估对比。通常情况下, 等效视数越大, 辐射分辨率越小, 相干斑噪声越小, 图像质量越高。本文算法等效视数为 16.194 8, 辐射分辨率为 2.219 3; 文献 [14] 等效视数为 9.833, 辐射分辨率为 2.768, 本文算法均优于文献 [14] 的方法, 验证了本文生成的海面舰船尾迹 SAR 图像在质量上具有较明显的优势。

图 12 海面舰船尾迹仿真 SAR 图像<sup>[14]</sup>Fig. 12 Simulation SAR image of ship wake on the sea surface<sup>[14]</sup>

### 3.2 算法加速效率测试

为评估GPU加速算法在计算效率上的提升效果,将本文GPU多核并行加速的BP算法与单CPU多核并行加速的BP算法进行对比。两种算法采用相同的并行策略,即按照图像空间的像素点对计算进程进行划分,以确保对比结果具有可比性和公平性。实验使用的计算机GPU为NVIDIA GeForce RTX 4070 Laptop, CPU为Intel(R) Core(TM) i9-14900HX。在GPU并行加速的BP成像算法处理过程中,距离向像素点数与方位向像素点数均为402,总像素点数为161 604,每个线程块大小为256 (16×16),距离向与方位向块数均为26,总线程数为173 056,略大于总像素点数。测试所用的SAR平台系统参数与表1中所列参数保持一致。实验针对海面直行舰船尾迹对应的原始回波数据进行聚焦处理。GPU-BP算法的计算时间仅为0.0811 s,而CPU-BP算法则耗时34.9864 s, GPU-BP算法的加速比高达431.4, GPU-BP算法在回波数据的聚焦处理速度上远远优于CPU-BP算法。体现出较大的性能提升,且两种算法的计算原理一致,生成的SAR图像一致。说明在针对如SAR数据处理计算等密集型任务进行加速时, GPU的并行计算能力能够显著提升算法的执行效率。同时, GPU的加速效果不仅体现在计算速度的提升上,还能在大数据处理和实时性要求较高的任务中展现出明显优势。例如,在SAR成像应用中,高效的数据聚焦处理对于实时监测和分析具有重要意义。GPU加速技术的引入,为解决此类问题提供了强有力的技术支持。

## 4 结论

本文针对海面舰船尾迹场景的电磁散射建模及SAR成像问题,从复杂场景的几何建模出发,生成了海面直行及转向舰船尾迹几何模型,再将仿真模型与计算流体力学方法生成的尾迹波高进行了对比,二者较高的一致性验证了本文对舰船尾迹建模的有效性。更进一步地,本文结合SBR算法及距离频域脉冲叠加法生成了SAR回波信号。同时研究设计了GPU多核并行加速的BP成像算法,实现回波信号快速聚焦处理,高效地生成不同极化条件下的海面舰船尾迹SAR图像,运算时间相较单CPU多核并行的BP算法有较大提升,加速比达到了431.4。仿真结果显示,生成的SAR图像能够清晰呈现尾迹轮廓及海面风向纹理等场景几何特征,在运算效率提升的同时保留了成像的精度。此外,通过对比数值评价指标验证了仿真SAR图像具有较好的质量。本文提出的海面舰船尾迹SAR图像仿真方法在海洋监

测和目标识别等方面具有广泛应用前景。

### 参考文献

- [1] 王运华,于越,张彦敏.海面风浪SAR成像仿真研究[J].海洋湖沼通报,2019(6):41-47.
- [2] ZILMAN G, ZAPOLSKI A, MAROM M. On detectability of a ship's Kelvin wake in simulated SAR images of rough sea surface[J]. *IEEE transactions on geoscience remote sensing*, 2015, 53(2): 609-619.
- [3] RIZAEV I G, ACHIM A. SynthWakeSAR: a synthetic SAR dataset for deep learning classification of ships at sea[J]. *Remote sensing*, 2022, 14(16): 3999.
- [4] LIU Y F, ZHAO J, QIN Y. A novel technique for ship wake detection from optical images[J]. *Remote sensing of environment*, 2021, 258: 112375.
- [5] THOMSON W. On ship waves[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 1887, 38(1): 409-434.
- [6] OUMANSOUR K, WANG Y, SAILLARD J. Multifrequency SAR observation of a ship wake[J]. *IEE proceedings: radar, sonar and navigation*, 1996, 143(4): 275-280.
- [7] 韦尹煜,吴振森,路越.粗糙海面上舰船Kelvin尾迹的电磁散射仿真[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(3): 438-442.  
WEI Y Y, WU Z S, LU Y. Electromagnetic scattering simulation of Kelvin wake in rough sea surface[J]. *Chinese journal of radio science*, 2016, 31(3): 438-442. (in Chinese)
- [8] HE Y, XU L, HUO J, et al. A synthetic aperture radar imaging simulation method for sea surface scenes combined with electromagnetic scattering characteristics[J]. *Remote sensing*, 2024, 16(17): 3335.
- [9] JENG S K, LEE S W, SHEN M H, et al. High frequency scattering from a ship at sea[C]//Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 1993: 1436-1439.
- [10] XU F, JIN Y Q. Bidirectional analytic ray tracing for fast computation of composite scattering from electric-large target over a randomly rough surface[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2009, 57(5): 1495-1505.
- [11] WANG J K, ZHANG M, CHEN J L, et al. Application of facet scattering model in SAR imaging of sea surface waves with Kelvin wake[J]. *Progress in electromagnetics research B*, 2016, 67: 107-120.
- [12] WANG J, GUO L, WEI Y, et al. Study on ship Kelvin wake detection in numerically simulated SAR images[J]. *Remote sensing*, 2023, 15(4): 1089.
- [13] LIU P, JIN Y Q. A study of ship rotation effects on SAR image[J]. *IEEE transactions on geoscience remote sensing*, 2017, 55(6): 3132-3144.
- [14] 杨鹏举,贾浩文,吴瑞.海面转向舰船尾迹的电磁散射建模与SAR成像模拟[J]. *电波科学学报*, 2025, 40(1): 124-

131.  
YANG P J, JIA H W, WU R. Electromagnetic scattering modeling and SAR image simulation of a turning ship wake on sea surface[J]. *Chinese journal of radio science*, 2025, 40(1): 124-131. (in Chinese)
- [15] 郭立新, 魏仪文. 复杂动态海面与目标电磁散射及回波仿真研究现状与展望[J]. *雷达学报*, 2023, 12(1): 76-109.
- [16] WU K, JIN G, XIONG X, et al. SAR image simulation based on effective view and ray tracing[J]. *Remote sensing*, 2022, 14(22): 5754.
- [17] 邢孟道, 马鹏辉, 楼屹杉, 等. 合成孔径雷达快速后向投影算法综述[J]. *雷达学报*, 2024, 13(1): 1-22.
- [18] ZHANG L, LI H L, QIAO Z J, et al. A fast BP algorithm with wavenumber spectrum fusion for high-resolution spotlight SAR imaging[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2014, 11(9): 1460-1464.
- [19] 闫佳楠, 聂丁, 张民. 转弯航行舰船开尔文尾迹散射特征研究[J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(4): 129-139.
- [20] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of geophysical research*, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [21] MÖLLER T, TRUMBORE B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection[J]. *Journal of graphics tools*, 1997, 2(1): 21-28.

### 作者简介

贾浩文 (1998—), 中国矿业大学博士研究生, 研究方向为电磁散射建模及合成孔径雷达成像技术。E-mail: [jhwxx@foxmail.com](mailto:jhwxx@foxmail.com)

王思凡 (1996—), 中国矿业大学博士研究生, 研究方向为计算电磁学。E-mail: [sfwang@cumt.edu.cn](mailto:sfwang@cumt.edu.cn)

赵雷 (1974—), 中国矿业大学教授, 博士生导师, ACES Fellow, IEEE 高级会员, 中国电子学会天线分会委员, IEEE AP-S Chapter Xuzhou 主席, 主要研究方向为射频微波器件、新型电磁材料、涡旋波通信、计算电磁学等。E-mail: [leizhao@cumt.edu.cn](mailto:leizhao@cumt.edu.cn)