

一种海洋涡旋SAR图像仿真方法

王宇航^{①②③} 杨敏^{①②③} 种劲松^{*①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100190)

摘 要: 海洋涡旋对海洋热循环起着关键作用, 是海洋科学研究中的一个重要分支。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)为海洋涡旋的观测和研究提供了大量的图像数据, 但是涡旋在SAR成像时会受到各种海洋环境因素的影响, 难以解译涡旋SAR图像特征。仿真SAR图像可以用于研究涡旋的特征, 但是目前极少有关于涡旋SAR图像仿真方法的研究。为了更好地解译SAR图像中的涡旋特征, 该文提出了一种涡旋SAR图像仿真方法。首先, 基于流体力学中典型的Burgers-Rott涡旋模型, 建立涡旋2维表面流场; 然后, 利用SAR海洋成像仿真模型, 仿真给定涡旋2维流场、海面风场以及雷达系统参数下的涡旋SAR图像。该文针对气旋式涡旋与反气旋式涡旋进行了仿真实验, 并建立了仿真涡旋SAR图像的相似度评价标准。实验结果表明, 仿真的涡旋SAR图像与真实星载涡旋SAR图像能够较好地吻合, 验证了方法的有效性。

关键词: 海洋涡旋; SAR图像; Burgers-Rott涡旋模型; 图像仿真

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)03-0382-09

DOI: 10.12000/JR18052

引用格式: 王宇航, 杨敏, 种劲松. 一种海洋涡旋SAR图像仿真方法[J]. 雷达学报, 2019, 8(3): 382-390. doi: 10.12000/JR18052.

Reference format: WANG Yuhang, YANG Min, and CHONG Jinsong. SAR image simulation method for oceanic eddies[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(3): 382-390. doi: 10.12000/JR18052.

SAR Image Simulation Method for Oceanic Eddies

WANG Yuhang^{①②③} YANG Min^{①②③} CHONG Jinsong^{*①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Oceanic eddies, which play an important role in ocean thermal cycling, is a significant branch of oceanic scientific research. Synthetic Aperture Radar (SAR) provides a large number of images for the observation and investigation of oceanic eddies. However, SAR imagery of oceanic eddies is affected by various environmental factors; as such, it is difficult to interpret eddy features from SAR images. Alternatively, simulated SAR images can be used to investigate eddy features; however, few methods have been established for simulating SAR images for oceanic eddies. To better interpret the eddy features in real SAR images, an SAR image simulation method for oceanic eddies is proposed in this paper. First, a two-dimensional eddy surface current field was built based on the Burgers-Rott vortex model in hydrodynamics; SAR eddy images were then simulated according to the given eddy current field, wind field, and radar parameters. Images of cyclonic and anticyclonic eddies were simulated and evaluated. In addition, a standard for evaluating the similarity between real and simulated SAR eddy images was established. The features of the simulated SAR

收稿日期: 2018-07-05; 改回日期: 2018-09-11; 网络出版: 2018-10-11

*通信作者: 种劲松 iecas_chong@163.com *Corresponding Author: CHONG Jinsong, iecas_chong@163.com

基金项目: 国家部委基金, 微波成像技术国家重点实验室基金(CXJJ_15S119)

Foundation Items: The National Ministries Foundation, The Foundation of National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging (CXJJ_15S119)

eddy images show good similarity with the real SAR eddy images, which validates the effectiveness of the proposed simulation method.

Key words: Oceanic eddies; Synthetic Aperture Radar (SAR) images; Burgers-Rott vortex model; Image simulation

1 引言

海洋涡旋是一种旋转的、以封闭环流为主要特征的水体,是由于各种气象因素作用和海洋动力不稳定性形成的。作为一种重要的海洋现象,涡旋不仅能够影响海洋流场与化学物质的输送,从而对海洋的环流结构和海洋生态等产生重要作用,还能通过海气相互作用,对风场、云及降雨等大气现象产生影响^[1,2]。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候、高分辨率、广覆盖面等优点,对海洋涡旋探测具有特殊意义,受到国际海洋遥感界的重视。然而,涡旋在SAR成像时会受到各种海洋环境因素的影响,通过真实SAR图像难以完全解译涡旋的特征。利用仿真SAR图像可以为涡旋的SAR图像特征解译提供指导,但是目前利用SAR图像对涡旋的研究主要集中在涡旋的统计性研究^[3-5]、涡旋的形成机制和成像分类^[6-8]以及涡旋的检测和特征提取方面的研究^[9-12],极少有关于涡旋SAR图像仿真方法的研究。

由于海面随机运动且电磁散射特性复杂,难以进行时间和空间上的SAR原始回波仿真。海浪谱能够描述随机海面不同波长海浪的能量分布情况,因此利用海浪谱可以很好地描述不同海况下随机海面的统计特征。海洋涡旋、内波、浅海地形、锋面等都可看作是通过波流交互作用,即利用自身流场改变海浪谱分布,并经过海面电磁散射模型,进而得以在SAR图像上体现。目前SAR海面图像仿真的常用的电磁散射模型包括Kirchhoff散射模型、Bragg散射模型以及组合表面散射模型^[13]。这些模型只考虑了1阶Bragg散射,仅适用于低频(小于L波段)SAR海面图像仿真。1997年, Romeiser和Alpers^[14,15]提出了改进的组合表面模型,该模型考虑了2阶Bragg波散射的影响,从而使仿真的SAR海面图像更接近实际情况。2002年, Romeiser^[16]利用该模型研究了浅海地形在SAR图像上的特征,并与声学多普勒流速剖面仪测量的浅海地形进行对比,验证了该模型用于SAR海面图像仿真的合理性;2011年, 欧阳越等^[17]利用该模型仿真了不同雷达参数下海洋内波图像,并同实际内波SAR图像进行对比,发现二者具有较高的一致性。但是目前,利用海面电磁散射模型对海洋涡旋SAR图像仿真的研究尚未见报道。

为此,本文提出了一种海洋涡旋SAR图像仿真方法,利用流体力学中典型的Burgers-Rott涡旋模型,建立涡旋的2维流场。利用SAR海洋成像仿真模型,仿真涡旋SAR图像。基于此方法,本文进行了气旋式涡旋与反气旋式涡旋SAR图像仿真实验,并将仿真SAR图像与ERS-2 SAR图像和ENVISAT-1 ASAR图像进行对比,从而验证该方法的有效性。

2 涡旋SAR图像仿真方法

本文建立的涡旋SAR图像仿真方法,是在给定2维涡旋流场和风场条件下,利用SAR海洋成像模型生成随机海面的2维海浪谱,再根据2维海浪谱与SAR图像之间的调制传递函数,生成仿真涡旋SAR图像。

涡旋SAR图像仿真方法分为两步,如图1所示。首先,输入涡旋流场参数,基于涡旋动力学模型建立涡旋2维流场(于2.1节介绍)。然后,将仿真的涡旋流场和海面风场输入到SAR海洋成像仿真模型,通过设置SAR参数获得仿真涡旋SAR图像(于2.2节介绍)。

2.1 涡旋2维流场仿真

涡旋一般遵循流体力学的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, 简写N-S)方程,根据方程中黏性力项、惯性力项以及离心力项的平衡关系,可以建立不同的涡旋模型。常见的涡旋模型包括Rankine涡旋、Oseen涡旋、Sullivan涡旋以及Burgers-Rott涡旋^[18-20],其中, Rankine涡旋模型没有考虑N-S方程中的黏性力项,流体以常角速度 ω 旋转,没有径向速度,因而不能产生涡旋的辐散、辐聚和上升运动; Oseen涡旋模型仅考虑N-S方程中惯性力项的局地项及黏性力项,其轨道是一个圆形涡旋,不符合实际SAR图像中涡旋的形态; Sullivan涡旋模型和Burgers-Rott涡旋模型考虑了N-S方程中全部的

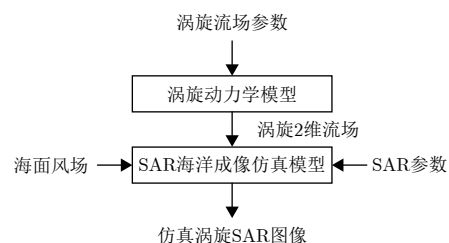


图1 涡旋SAR图像仿真方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the simulation method of SAR eddy image

黏性力项、惯性力项及离心力项,但由于Sullivan涡旋模型的轨道是一个双螺旋涡旋,Burgers-Rott涡旋模型的轨道是一个螺旋形涡旋,后者与真实SAR图像所呈现的涡旋形状更为接近,因此本文选用Burgers-Rott涡旋模型来建立海洋涡旋的流场。

Burgers-Rott涡旋模型是从N-S方程求得的一个涡旋解^[19,20],假定涡旋是定常和轴对称的,涡旋速度场在柱坐标系下表示为

$$\begin{cases} V_r = \frac{dr}{dt} = -\frac{\alpha}{2}r \\ V_\theta = r \frac{d\theta}{dt} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left(1 - e^{-\frac{\alpha r^2}{4\nu}}\right) \\ V_z = \frac{dz}{dt} = \alpha z \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_r, V_θ, V_z 分别是 r, θ, z 方向的速度分量, α 为吸入强度, ν 为黏性系数, Γ_0 是 $r \rightarrow \infty$ 时的速度环量, $\Gamma = 2\pi r v_\theta$ 。

将式(1)转化为直角坐标系,涡旋速度场可表示为

$$\begin{cases} V_x = -\frac{\alpha}{2}x - \frac{\Gamma_0\alpha}{8\pi\nu}y \\ V_y = \frac{\Gamma_0\alpha}{8\pi\nu}x - \frac{\alpha}{2}y \end{cases} \quad (2)$$

其中, V_x 为涡旋速度场在 x 方向上的速度分量, V_y 是涡旋速度场在 y 方向上的速度分量。

通过设置参数 $\alpha, \Gamma_0/\nu$ 的值,根据式(2)可以得到涡旋2维流场。通过仿真发现, α 的值会影响涡旋流场流速的大小, α 的值越大,涡旋流场流速越大,反之则越小; α 的正负影响涡旋流场的旋向, α 为正,流场顺时针旋转, α 为负,流场逆时针旋转; Γ_0/ν 的值则会影响涡旋臂的曲率, Γ_0/ν 的值越大,涡旋臂的曲率越大。

2.2 涡旋SAR图像仿真

获得了涡旋的流场之后,下一步将进行涡旋SAR图像的仿真。本文使用SAR海洋成像仿真模型来仿真涡旋SAR图像。SAR海洋成像仿真模型主要分为波流交互作用模型、雷达后向散射模型和SAR成像模型3个部分,如图2所示。

首先,将仿真的涡旋2维流场和海面风场输入到波流交互作用模型,通过求解作用量谱平衡方程,计算给定海面流场和海面风场下被调制后的海浪谱。作用量谱平衡方程如式(3)所示^[21]:

$$\frac{\partial N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{\partial t} + [c_g(\mathbf{k}) + U(\mathbf{x}, t)] \frac{\partial N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{\partial \mathbf{x}} - \mathbf{k} \frac{\partial U(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{\partial \mathbf{k}} = S(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) \quad (3)$$

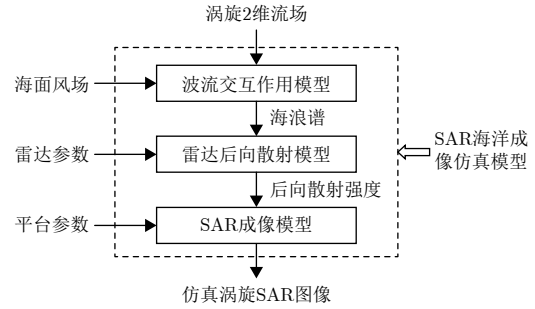


图 2 SAR海洋成像仿真模型示意图^[22]

Fig. 2 Schematic diagram of oceanic SAR imagery simulation model^[22]

其中, N 为微尺度波作用量谱密度, $\mathbf{x} = (x, y)$ 为空间位置矢量, $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ 为波数矢量, U 为表面流场, c_g 为被调制波浪的群速度, S 为源函数(风场输入、非线性波-波作用和弥散等作用之和), 在本文模型中采用的源函数表达式为

$$S(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) = \mu(\mathbf{k})N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) \left(1 - \frac{N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{N_0(\mathbf{k})}\right) \quad (4)$$

其中, N_0 为不存在海流时平衡状态下的作用量谱密度, μ 为松弛率。

作用量谱密度与海浪谱的关系为^[23]

$$N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) = \frac{\rho\omega_0(\mathbf{k})}{k} \psi(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) \quad (5)$$

其中, $\omega_0(\mathbf{k}) = \sqrt{gk + (\tau/\rho)k^3}$, τ 为表面张力, ρ 为海水密度, ψ 为海浪谱。

令 $Q(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) = 1/N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)$, $Q_0(\mathbf{k}) = 1/N_0(\mathbf{k})$, 则被流场调制后的海浪谱为

$$\begin{aligned} \frac{\psi(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{\psi_0(\mathbf{k})} &= \frac{Q_0(\mathbf{k})}{Q_0(\mathbf{k}) + \delta Q(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\delta Q(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)}{Q_0(\mathbf{k})}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, δQ 表示调制引起的作用量谱变化量。

然后,将计算得到的海浪谱输入到雷达后向散射模型,在给定雷达频率、入射角、极化方式及雷达视向等雷达参数下,仿真涡旋SAR图像后向散射强度。本文采用的雷达后向散射模型为改进的组合表面模型,是Romeiser和Alpers等在Bragg共振散射模型基础上的改进^[14,15]。该模型同时考虑了长波和中波对短波的倾斜调制和水动力调制,所以从理论和试验研究上更能表现海面微波散射的实际情况,是目前最为完善的海面微波散射模型之一。该模型是基于2维海面坡度,通过傅里叶变换对后向散射截面进行泰勒级数展开,并对后向散射截面进

行时间和空间上的平均。由于1阶项平均后为0,因此得到2阶Bragg散射后的海面归一化后向散射系数为^[14,22]

$$\begin{aligned}
\langle \sigma \rangle &= \sigma^{(0)} + \langle \sigma^{(2)} \rangle \\
&= \sigma|_{s=0} + \iint \left(\frac{\partial^2 \overset{\wedge}{\sigma}}{\partial s_p \partial s_p} \Big|_{s=0} + \frac{\partial^2 \overset{\vee}{\sigma}}{\partial s_p \partial s_p} \Big|_{s=0} \right) \\
&\quad \cdot k_p^2 \psi(\mathbf{k}) d^2 \mathbf{k} \\
&\quad + \iint \left(\frac{\partial^2 \overset{\wedge}{\sigma}}{\partial s_n \partial s_n} \Big|_{s=0} + \frac{\partial^2 \overset{\vee}{\sigma}}{\partial s_n \partial s_n} \Big|_{s=0} \right) \\
&\quad \cdot k_n^2 \psi(\mathbf{k}) d^2 \mathbf{k} \\
&\quad + \iint \left(\frac{\partial^2 \overset{\wedge}{\sigma}}{\partial s_p \partial s_n} \Big|_{s=0} + \frac{\partial^2 \overset{\vee}{\sigma}}{\partial s_p \partial s_n} \Big|_{s=0} \right) \\
&\quad + \frac{\partial^2 \overset{\wedge\wedge}{\sigma}}{\partial s_p \partial s_n} \Big|_{s=0} + \frac{\partial^2 \overset{\vee\vee}{\sigma}}{\partial s_n \partial s_p} \Big|_{s=0} \\
&\quad \cdot k_p k_n \psi(\mathbf{k}) d^2 \mathbf{k} \quad (7)
\end{aligned}$$

其中, $\sigma^{(0)}$ 为平静海面的归一化后向散射系数; $\langle \sigma^{(2)} \rangle$ 表示表面坡度引起的2阶Bragg散射之和; 符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均; $\mathbf{s} = (s_p, s_n)$ 为海面坡度; k_p, k_n 分别为平行和垂直于雷达视向的Bragg波波数分量; $\psi(\mathbf{k})$ 为海浪波数谱; 符号 \wedge 和 \vee 分别表示 σ 对波数 \mathbf{k} 的傅里叶变换及其共轭; $\wedge\wedge$ 和 $\vee\vee$ 表示 σ 对组合波数 $k_1 + k_2$ 的傅里叶变换及其共轭; $\wedge\vee$ 和 $\vee\wedge$ 表示 σ 对组合波数 $k_1 - k_2$ 的傅里叶变换及其共轭。

上述过程中, 利用海浪谱与雷达后向散射模型得到仿真的海面归一化后向散射系数, 但这是一个实孔径雷达成像过程, SAR图像仿真还需考虑海面运动的影响。当目标存在沿雷达视线方向的径向速度时, 将在方位向上产生偏移 Δx :

$$\Delta x = -\frac{R}{V} v_r = \frac{R\lambda}{2V} f_D \quad (8)$$

其中, R 是雷达至目标的距离, V 是平台飞行速度, λ 是雷达波长, $f_D = -\frac{2v_r}{\lambda}$ 是目标速度导致的 Doppler 谱中心偏移。对于海面而言, 由于其各点速度不同, 在方位向上偏移量不同, 导致 SAR 海面图像产生压缩或拉伸的现象, 即速度聚束效应^[24]。此外, 分辨单元内不同散射点速度的分布方差将造成回波 Doppler 谱展宽, 并导致分辨率下降。SAR 成像模型通过计算每个分辨单元的平均 Doppler 谱中心和方差引入海面运动对 SAR 成像造成的影响。

这里采用 Romeiser 和 Thompson^[25] 给出的双高斯形 Doppler 谱模型计算 Doppler 谱中心和方差, 该模型将海面回波 Doppler 谱分成朝向雷达和远离雷

达两个传播方向的 Bragg 波 Doppler 谱的叠加, 每个 Doppler 谱分量为高斯形, 其具体表达式为

$$\begin{aligned}
W(f_D) &= \frac{\langle \sigma_+ \rangle}{\sqrt{2\pi\gamma_{D+}^2}} e^{-(f_D - \langle f_{D+} \rangle)^2 / \gamma_{D+}^2} \\
&\quad + \frac{\langle \sigma_- \rangle}{\sqrt{2\pi\gamma_{D-}^2}} e^{-(f_D - \langle f_{D-} \rangle)^2 / \gamma_{D-}^2} \quad (9)
\end{aligned}$$

其中, \pm 表示远离雷达方向和朝向雷达方向的两组 Bragg 波分量, $\langle f_{D\pm} \rangle$ 表示经过归一化后向散射系数 σ 加权的平均 Doppler 中心; $\gamma_{D\pm}$ 表示 Doppler 谱的方差。 $\langle f_{D\pm} \rangle$ 和 $\gamma_{D\pm}$ 的具体计算过程可以参考文献^[25], 这里不再赘述。

另外, 仿真的 SAR 图像还需考虑噪声的影响, 本文涡旋 SAR 图像仿真过程中, 仅考虑热噪声对仿真 SAR 图像信噪比的影响。信噪比由噪声等效后向散射系数以及海面归一化后向散射系数所决定:

$$\text{SNR(dB)} = \langle \sigma \rangle - NE\sigma^0 \quad (10)$$

其中, 海面归一化后向散射系数 $\langle \sigma \rangle$ 由入射角、雷达频率、极化方式、海面风速等参数所决定, $NE\sigma^0$ 为噪声等效后向散射系数, 由系统硬件参数所决定。因此, SAR 成像模型根据给定的仿真输入参数计算信噪比, 从而得到具有统计特性的仿真涡旋 SAR 图像。

3 涡旋 SAR 图像仿真实验

根据涡旋旋转方向的不同, 可将涡旋分为气旋式涡旋与反气旋式涡旋^[26]。气旋式涡旋在北半球逆时针旋转, 在南半球顺时针旋转; 反气旋式涡旋在北半球顺时针旋转, 在南半球逆时针旋转。不同旋转方向的涡旋将产生不同的涡旋流场, 从而在 SAR 图像中呈现不同的涡旋特征。下面, 本文分别针对气旋式涡旋与反气旋式涡旋进行仿真实验。

3.1 气旋式涡旋仿真实验

图3是一幅 ERS-2 SAR 图像, 图像获取时间为 2009.08.19, 02:23:50 UTC, 获取地点为中国东海海域。图中方框1处为一个气旋式涡旋, 旋转方向为逆时针。为了便于对比仿真 SAR 图像与真实 SAR 图像, 将方框1处的涡旋截取出来, 截取图像尺寸为 18 km × 24 km, 如图4所示。ERS-2 SAR 图像的具体雷达参数如表1所示。

从欧洲中期天气预报中心(Europe Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)获取 2009.08.19, 03:00:00 时刻的风场再分析资料, 分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。根据数据显示, 涡旋区域附近的风速为 1.4 m/s, 风向为 257.9° 。从全球海洋数

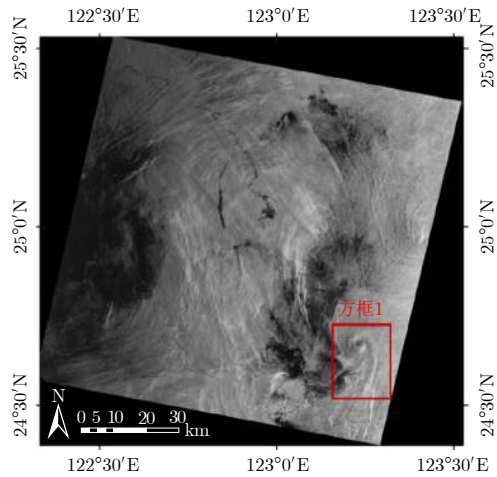


图 3 中国东海海域获取的ERS-2 SAR图像, 获取时间为 2009.08.19, 02:23:50 UTC

Fig. 3 ERS-2 SAR image of the East China Sea obtained on August 19, 2009 at 02:23:50 UTC

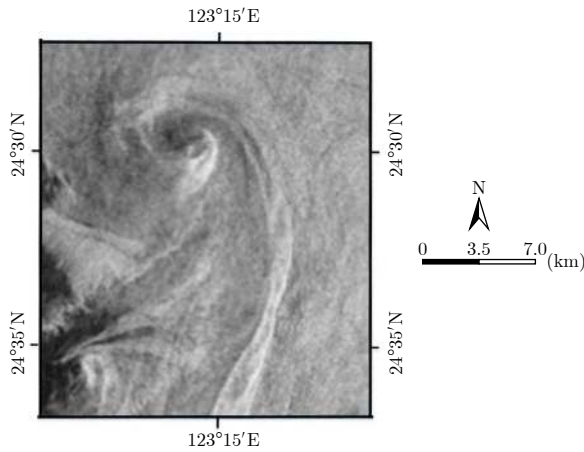


图 4 从方框1处截取的涡旋SAR图像

Fig. 4 Enlargement of the eddy in Frame 1

据同化系统(Global Ocean Data Assimilation System, GODAS)获取相同位置的5日平均流场再

表 1 ERS-2 SAR参数

Tab. 1 SAR parameters of ERS-2

参数	数值
极化方式	VV
波段	C
入射角	23.0°
平台高度	780 km
平台速度	7500 m/s

分析资料, 分辨率为 $(1/3)^\circ \times 1^\circ$ 。根据数据显示, 涡旋区域附近的流速为0.61 m/s。因此, 设置参数 α 为-0.003486, 流场大小设置为18 km \times 24 km, 空间分辨率为100 m, 雷达参数设置为表1中ERS-2 SAR参数。

图5(a)、图5(b)分别是该涡旋的仿真SAR图像与获取的真实SAR图像, 仿真时设定的雷达参数、海面风场条件与真实SAR图像获取条件完全一致。对比图5(a)、图5(b)两图发现, 仿真SAR图像与真实SAR图像中的涡旋臂形状几乎一致, 涡旋臂的亮暗特征也基本吻合。从逆时针方向看, 涡旋臂由外到内的亮暗特征均为亮-暗-亮, 这种亮暗特征的变化是由雷达后向散射引起的布拉格波谱密度变化导致的^[7]。这初步验证了仿真方法的正确性。

为了进一步验证仿真方法的正确性, 定量地描述仿真SAR图像与真实SAR图像的中涡旋的相似程度, 采用文献[9]中基于对数螺旋线边缘拟合的SAR图像涡旋信息提取方法, 提取仿真SAR图像和真实SAR图像中涡旋的中心位置、直径及边缘长度, 并加以比较。拟合及提取结果如图6所示, 红色加号表示涡旋中心位置, 黄色箭头表示涡旋直径, 蓝色曲线表示涡旋边缘, 具体数值如表2所示。

对比仿真SAR图像与真实SAR图像的涡旋信息提取结果, 可以发现两幅图像中涡旋的中心位置较

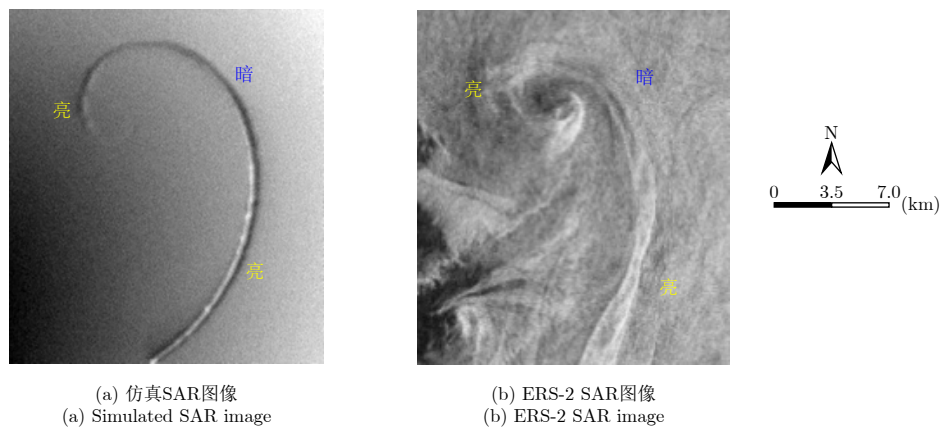


图 5 相同参数下仿真SAR图像与ERS-2 SAR图像对比图

Fig. 5 Comparison of simulated SAR image and ERS-2 SAR image under the same parameters

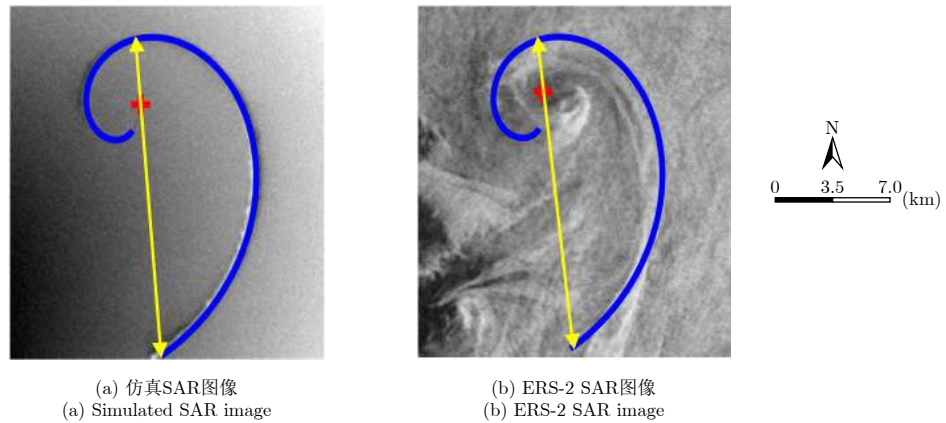


图6 仿真SAR图像与ERS-2 SAR图像涡旋信息提取

Fig. 6 Eddy information extraction of simulated SAR image and ERS-2 SAR image

表2 涡旋信息提取结果

Tab. 2 Results of eddy information extraction

SAR图像	涡旋中心位置	涡旋直径	涡旋边缘长度
仿真SAR图像	(116,75)	18.9 km	35.7 km
真实SAR图像	(113,71)	18.7 km	35.4 km
绝对/相对误差	(3,4)/—	0.2 km/0.011	0.3 km/0.008

为一致，方位向和距离向上仅相差3~4个像素点，涡旋直径及边缘长度的相对误差均不超过0.011，证明本文提出的基于Burgers-Rott涡旋模型的涡旋SAR图像仿真方法能够实现气旋式涡旋的SAR图像仿真，并且仿真SAR图像与真实SAR图像能够较好地吻合。

3.2 反气旋式涡旋仿真实验

3.1节对气旋式涡旋进行了仿真实验，本节将针对反气旋式涡旋进行仿真实验。图7是一幅ENVISAT-1

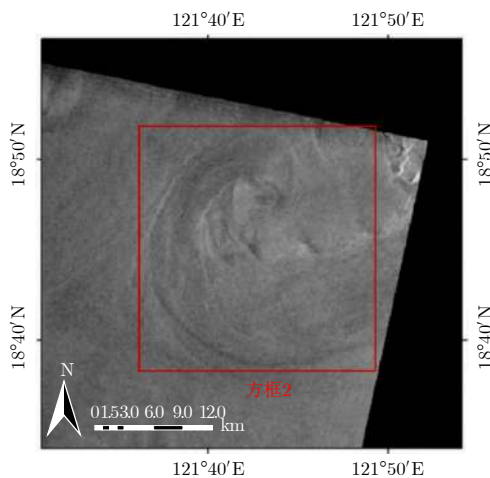


图7 吕宋海峡获取的ENVISAT-1 ASAR图像，获取时间为2010.06.11, 01:51:48 UTC

Fig. 7 ENVISAT-1 ASAR image of the Luzon Strait obtained on June 11, 2010 at 01:51:48 UTC

ASAR图像，图像获取时间为2010.06.11, 01:51:48 UTC，获取地点在吕宋海峡。图中方框2处为一个反气旋式涡旋，旋转方向为顺时针。将方框2处的涡旋截取出来，截取图像尺寸为24 km×24 km，如图8所示。ENVISAT-1 ASAR图像的具体雷达参数如表3所示。

从ECMWF获取2010.06.11, 03:00:00时刻的风场再分析资料，分辨率为0.125°×0.125°。根据数据显示，涡旋区域附近的风速为2.1 m/s，风向为45°。从GODAS获取相同位置的5日平均流场再分析资料，

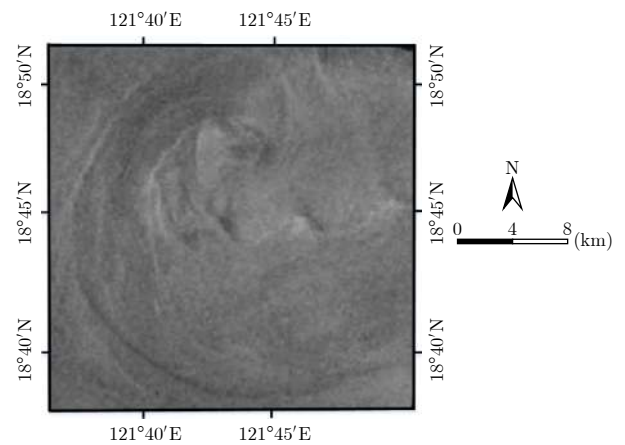


图8 方框2处截取的涡旋SAR图像

Fig. 8 Enlargement of the eddy in Frame 2

表3 ENVISAT-1 ASAR参数

Tab. 3 ASAR parameters of ENVISAT-1

参数	数值
极化方式	HH
波段	C
入射角	26.7°
平台高度	800 km
平台速度	7455 m/s

分辨率为 $(1/3)^\circ \times 1^\circ$ 。根据数据显示, 涡旋区域附近的流速为 0.23 m/s 。因此, 设置参数 α 为 0.000657 , 流场大小设置为 $24 \text{ km} \times 24 \text{ km}$, 空间分辨率为 100 m , 雷达参数设置为表3中ENVISAT-1 ASAR参数。

图9(a)、图9(b)分别是该涡旋的仿真SAR图像与真实SAR图像, 仿真时设定的雷达参数、海面风场条件与真实SAR图像完全一致。对比图9(a)、图9(b)两图发现, 仿真SAR图像与真实SAR图像中的涡旋

形状基本一致, 涡旋臂的亮暗特征也较为吻合。从顺时针方向看, 涡旋臂从外到内均呈现为由暗到亮的特征。该结果与Lyzenga等人^[6]研究结果一致, 初步验证了仿真方法的正确性。

为了定量地描述仿真SAR图像与真实SAR图像的中涡旋的相似性, 同样采用3.1节中的分析方法, 得到涡旋拟合结果如图10所示, 提取的涡旋信息如表4所示。

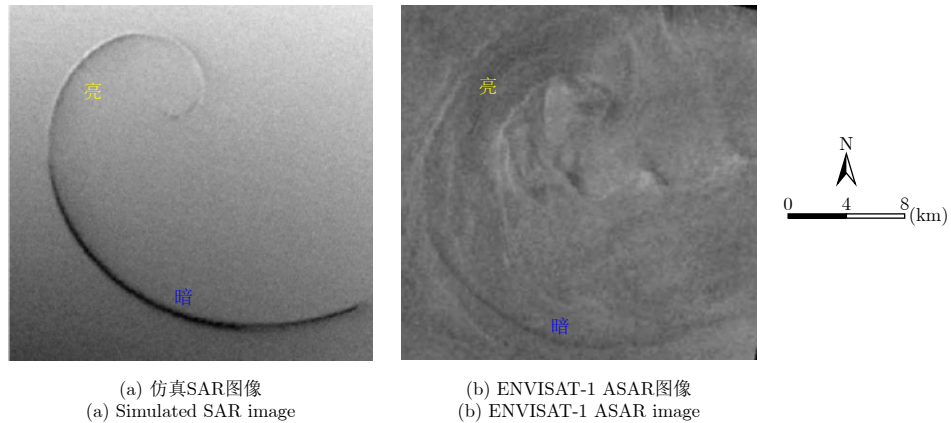


图 9 相同参数下仿真SAR图像与ENVISAT-1 ASAR图像对比图

Fig. 9 Comparison of simulated SAR image and ENVISAT-1 ASAR image under the same parameters

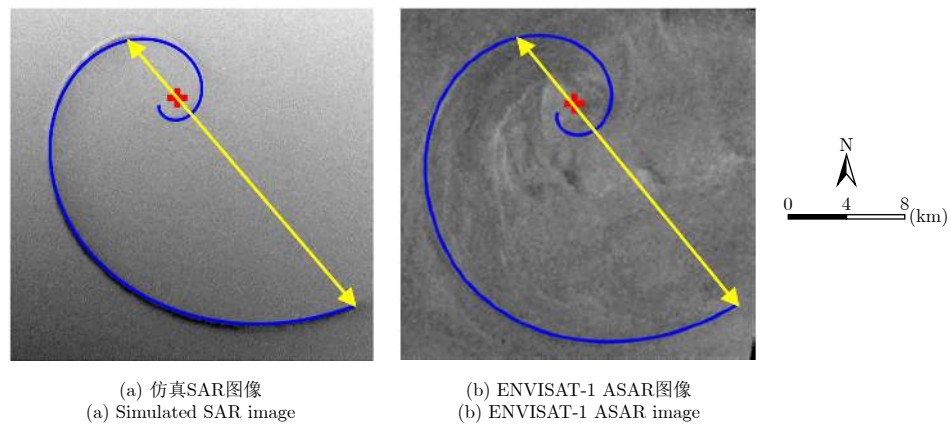


图 10 仿真SAR图像与ENVISAT-1 ASAR图像涡旋信息提取

Fig. 10 Eddy information extraction of simulated SAR image and ENVISAT-1 ASAR image

表 4 涡旋信息提取结果

Tab. 4 Results of eddy information extraction

SAR图像	涡旋中心位置	涡旋直径	涡旋边缘尺寸
仿真SAR图像	(144,78)	24.0 km	49.4 km
真实SAR图像	(147,81)	23.9 km	49.7 km
绝对/相对误差	(3,3)/—	0.1 km/0.004	0.3 km/0.006

对比仿真SAR图像与真实SAR图像的涡旋信息提取结果, 可以发现两幅图像中涡旋的中心位置较为接近, 方位向和距离向上均相差3个像素点, 涡

旋直径及边缘尺寸相对误差均不超过 0.006 , 这进一步验证了仿真方法的正确性, 说明本文提出的基于Burgers-Rott涡旋模型的涡旋SAR图像仿真方法能够实现反气旋式涡旋的SAR图像仿真。

4 总结

本文基于Burgers-Rott涡旋模型, 提出了一种涡旋SAR图像仿真方法, 并分别针对气旋式涡旋与反气旋式涡旋进行了仿真实验。通过将仿真SAR图像与真实SAR图像对比验证发现, 本文提出的涡旋SAR图像仿真方法能够实现气旋式涡旋和反气旋式

涡旋的SAR图像仿真,且仿真SAR图像与真实SAR图像能够较好地吻合。

通过涡旋SAR图像仿真实验发现,无论气旋式涡旋还是反气旋式涡旋,其涡旋臂在SAR图像中都会呈现亮暗交替变化的特征。其中,气旋式涡旋臂呈现两个亮暗交替周期,即亮-暗-亮;反气旋式涡旋臂呈现一个亮暗交替周期,即暗-亮。这是由于这两个涡旋臂的曲率不同,气旋式涡旋臂曲率较大,亮暗交替周期较多,反气旋式涡旋臂曲率较小,亮暗交替周期较少。

由于涡旋在SAR成像时会受到各种海洋环境因素的影响,通过真实SAR图像难以完全解译涡旋的特征。本文提出的SAR图像仿真方法能够弥补这种不足,可以清晰地获取涡旋的尺度、亮暗等特征,这为海洋涡旋特征的解译和提取提供了便利。

参 考 文 献

- [1] KARIMOVA S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(8): 1107–1124. doi: [10.1016/j.asr.2011.10.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027).
- [2] IVANOV A Y and GINZBURG A I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images[J]. *Journal of Earth System Science*, 2002, 111(3): 281–295. doi: [10.1007/BF02701974](https://doi.org/10.1007/BF02701974).
- [3] KARIMOVA S and GADE M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(10): 2394–2414. doi: [10.1080/01431161.2016.1145367](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1145367).
- [4] XU G J, YANG J S, DONG C M, *et al.* Statistical study of submesoscale eddies identified from synthetic aperture radar images in the Luzon Strait and adjacent seas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(18): 4621–4631. doi: [10.1080/01431161.2015.1084431](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1084431).
- [5] TAVRI A, SINGHA S, LEHNER S, *et al.* Observation of sub-mesoscale eddies over Baltic Sea using TerraSAR-X and Oceanographic data[C]. Proceedings of Living Planet Symposium 2016, Prague, Czech Republic, 2016.
- [6] LYZENGA D and WACKERMAN C. Detection and classification of ocean eddies using ERS-1 and aircraft SAR images[C]. Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, 1997: 1267–1271.
- [7] MITNIK L, DUBINA V, and LOBANOV V. Cold season features of the Japan Sea coastal zone revealed by ERS SAR[C]. Proceedings of ERS-Envisat Symposium “Looking Down to Earth in the New Millennium”, Noordwijk, Netherlands, 2000: 4232–4242.
- [8] LAVROVA O Y and MITYAGINA M I. Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas[J]. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, 52(9): 974–987. doi: [10.1134/S0001433816090176](https://doi.org/10.1134/S0001433816090176).
- [9] 杨敏, 种劲松. 基于对数螺旋线边缘拟合的SAR图像涡旋信息提取方法[J]. *雷达学报*, 2013, 2(2): 226–233. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13004](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13004).
- YANG Min and CHONG Jing-song. A method based on logarithmic spiral edge fitting for information extraction of eddy in the SAR image[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 226–233. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13004](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13004).
- [10] DRESCHLER-FISCHER L, LAVROVA O, SEPPKE B, *et al.* Detecting and tracking small scale eddies in the black sea and the Baltic Sea using high-resolution Radarsat-2 and TerraSAR-X imagery (DTeddie)[C]. Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014: 1214–1217. DOI: [10.1109/IGARSS.2014.6946650](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946650).
- [11] KARIMOVA S. An approach to automated spiral eddy detection in SAR images[C]. Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, Texas, USA, 2017: 743–746. DOI: [10.1109/IGARSS.2017.8127059](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127059).
- [12] HUANG D M, DU Y L, HE Q, *et al.* DeepEddy: A simple deep architecture for mesoscale oceanic eddy detection in SAR images[C]. Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Calabria, Italy, 2017: 673–678. DOI: [10.1109/ICNSC.2017.8000171](https://doi.org/10.1109/ICNSC.2017.8000171).
- [13] 于祥祯. 顺轨干涉SAR对海洋表面流场监测的若干问题研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2012: 30–34.
- YU Xiang-zhen. Study on some problems of ocean surface current detection by along-track interferometric SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 30–34.
- [14] ROMEISER R, ALPERS W, and WISMANN V. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C11): 25237–25250. doi: [10.1029/97JC00190](https://doi.org/10.1029/97JC00190).
- [15] ROMEISER R and 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C11): 25251–25267. doi: [10.1029/97JC00191](https://doi.org/10.1029/97JC00191).
- [16] ROMEISER R, SEIBT-WINCKLER A, HEINEKE M, *et al.* Validation of current and bathymetry measurements in the German Bight by airborne along-track interferometric SAR[C]. Proceedings of 2002 IEEE International Geoscience

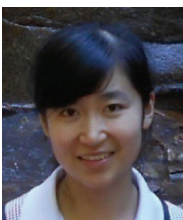
- and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 2002: 1822–1824. DOI: [10.1109/IGARSS.2002.1026266](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026266).
- [17] OUYANG Y, CHONG J S, WU Y R, *et al.* Simulation studies of internal waves in SAR images under different SAR and wind field conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1734–1743. doi: [10.1109/TGRS.2010.2087384](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2087384).
- [18] 朱克勤, 彭杰. 高等流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 132–138.
ZHU Ke-qin and PENG Jie. *Advanced Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 132–138.
- [19] BURGERS J M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1948, 1: 171–199. doi: [10.1016/S0065-2156\(08\)70100-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70100-5).
- [20] ROTT N. On the viscous core of a line vortex[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 1958, 9(5/6): 543–553. doi: [10.1007/BF02424773](https://doi.org/10.1007/BF02424773).
- [21] LONGUET-HIGGINS M S and STEWART R W. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1964, 11(4): 529–562. doi: [10.1016/0011-7471\(64\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0011-7471(64)90001-4).
- [22] 余颖, 王小青, 朱敏慧, 等. 基于二阶散射的海面三尺度雷达后向散射模型[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1771–1775. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022).
- YU Ying, WANG Xiao-qing, ZHU Min-hui, *et al.* Three-scale radar backscattering model of the ocean surface based on second-order scattering[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1771–1775. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022).
- [23] WHITHAM G B. A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a Lagrangian[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2): 273–283. doi: [10.1017/S0022112065000745](https://doi.org/10.1017/S0022112065000745).
- [24] ALPERS W R, ROSS D B, and RUFENACH C L. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C7): 6481–6498. doi: [10.1029/JC086iC07p06481](https://doi.org/10.1029/JC086iC07p06481).
- [25] ROMEISER R and THOMPSON D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 446–458. doi: [10.1109/36.823940](https://doi.org/10.1109/36.823940).
- [26] ROBINSON I S. *Discovering the Ocean from Space: The Unique Applications of Satellite Oceanography*[M]. Chichester, UK: Springer-Praxis, 2010: 76–78.

作者简介



王宇航(1992–), 女, 博士生, 中国科学院电子学研究所。研究方向为SAR海洋遥感探测与应用。

E-mail: iecas_wang@126.com



杨敏(1988–), 女, 硕士。2013年在中国科学院电子学研究所获得硕士学位。研究方向为SAR海洋遥感探测与应用。

E-mail: minyang993@126.com



种劲松(1969–), 女, 博士, 研究员, 博士生导师。2000年在北京航空航天大学宇航学院获得硕士学位, 2003年在中国科学院研究生院获得博士学位, 现担任中国科学院电子学研究所研究员。研究方向为SAR海洋微波遥感。

E-mail: iecas_chong@163.com