

## 基于微面元模型的海面舰船尾迹长波红外偏振建模与仿真分析

管沛豪 周平 杨丽娜 温馨 李冠霖 史浩东 孙洪宇 王祺 王稼禹 陈明策 李英超

### Modeling and simulation analysis of long-wave infrared polarization of ship wakes on the sea surface based on the microfacet model

GUAN Pei-hao, ZHOU Ping, YANG Li-na, WEN Xin, LI Guan-lin, SHI Hao-dong, SUN Hong-yu, WANG Qi, WANG Jia-yu, CHEN Ming-ce, LI Ying-chao

#### 引用本文:

管沛豪, 周平, 杨丽娜, 温馨, 李冠霖, 史浩东, 孙洪宇, 王祺, 王稼禹, 陈明策, 李英超. 基于微面元模型的海面舰船尾迹长波红外偏振建模与仿真分析[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0160

GUAN Pei-hao, ZHOU Ping, YANG Li-na, WEN Xin, LI Guan-lin, SHI Hao-dong, SUN Hong-yu, WANG Qi, WANG Jia-yu, CHEN Ming-ce, LI Ying-chao. Modeling and simulation analysis of long-wave infrared polarization of ship wakes on the sea surface based on the microfacet model[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0160

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0160>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 基于矢量衍射的光学系统设计与偏振像差补偿

Optical system design and polarization aberration compensation based on vector diffraction

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 839 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0006>

#### 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响

Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 318 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0035>

#### 基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法研究

Detection method of weak ship wake signals based on the synchronous accumulation method

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1272 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0014>

#### 舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究

Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1333 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0043>

#### 基于偏振特征重构的海面耀光抑制方法研究

Sea surface glint suppression method based on polarization feature reconstruction

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1297 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0008>

#### 基于大气多次散射的波浪水下偏振模式研究

The polarization mode of underwater waves based on atmospheric multiple scattering

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1324 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0223>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-14

## 基于微面元模型的海面舰船尾迹长波红外偏振建模与仿真分析

管沛豪<sup>1,2</sup>, 周平<sup>2,3</sup>, 杨丽娜<sup>3</sup>, 温馨<sup>3</sup>, 李冠霖<sup>1,2</sup>, 史浩东<sup>1,2</sup>, 孙洪宇<sup>1,2</sup>,  
王祺<sup>1,2</sup>, 王稼禹<sup>1,2</sup>, 陈明策<sup>4</sup>, 李英超<sup>1,2\*</sup>

1. 长春理工大学吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 中国兵器第一研究院, 北京 100072;
4. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

**摘要:**针对复杂海况下舰船尾迹红外探测需求, 提出基于微面元模型的动态舰船尾迹红外偏振特性分析方法, 构建了复杂海面背景的尾迹红外偏振效应解析模型, 基于 P-M 海谱模型与开尔文尾迹模型, 引入微面元双向反射分布函数, 分析了动态海面背景下舰船尾迹红外偏振特性规律, 掌握了航速、吃水深度、风速和风向等参数对尾迹红外偏振度、偏振角、对比度等特性的影响。其中, 尾迹红外偏振度图像的平均对比度较传统强度图像提升 159%, 偏振角图像提升 258%。采用数学仿真与计算流体力学仿真相对比的方法对尾迹红外偏振效应解析模型进行验证, 结果相似度优于 95.7%, 将尾迹实拍图与仿真结果进行对比, 二者具有较高相似度, 验证了该模型对于海面背景下舰船尾迹红外偏振特性仿真分析的有效性。本研究为复杂海况下舰船高精度、抗干扰探测与识别提供了重要的理论基础。

**关键词:**舰船尾迹; 红外偏振; 斯托克斯矢量; 偏振仿真

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0160 CSTR: 32171.14.CO.2025-0160

收稿日期: 2025-12-19; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61890960); 光电测量与智能感知中关村开放实验室开放基金 (No. LabSOMP-2024-17)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61890960); Optoelectronic Measurement and Intelligent Perception Zhongguancun Open Lab (No. LabSOMP-2024-17)

# Modeling and simulation analysis of long-wave infrared polarization of ship wakes on the sea surface based on the microfacet model

GUAN Pei-hao<sup>1,2</sup>, ZHOU Ping<sup>2,3</sup>, YANG Li-na<sup>3</sup>, WEN Xin<sup>3</sup>, LI Guan-lin<sup>1,2</sup>, SHI Hao-dong<sup>1,2</sup>,  
SUN Hong-yu<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, WANG Jia-yu<sup>1,2</sup>, CHEN Ming-ce<sup>4</sup>, LI Ying-chao<sup>1,2\*</sup>

(1. *Jilin Provincial Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

3. *China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;*

4. *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: 13944068295@163.com*

**Abstract:** Addressing the requirement for infrared detection of ship wakes under complex sea conditions, a method for analyzing the dynamic infrared polarization characteristics of ship wakes based on the microfacet model is proposed. An analytical model for the infrared polarization effects of wakes against a complex sea surface background is constructed. Based on the P-M sea spectrum model and the Kelvin wake model, the microfacet bidirectional reflectance distribution function is introduced to analyze the infrared polarization characteristics of ship wakes under dynamic sea surface backgrounds. The influence of parameters such as ship speed, draught, wind speed, and wind direction on the wake's infrared polarization characteristics, including the degree of polarization (DOP), angle of polarization (AOP), and contrast, is investigated. Notably, the average contrast of the wake's infrared DOP image is improved by 159% compared to traditional intensity images, and the AOP image shows an improvement of 258%. The analytical model for wake infrared polarization effects is validated by comparing mathematical simulations with computational fluid dynamics simulations, achieving a similarity of over 95.7%. A comparison between actual captured wake images and simulation results shows high similarity, confirming the effectiveness of the proposed model for simulating and analyzing the infrared polarization characteristics of ship wakes against a sea background. This study provides an important theoretical foundation for high-precision, anti-interference detection and identification of ships under complex sea conditions.

**Key words:** ship wakes; infrared polarization; Stokes vector; polarization simulation

## 1 引言

尾迹是舰船在海面航行时在船后留下的V型波动分布,可以反映出舰船的类型、航行状态等特征<sup>[1]</sup>。自然界中的海水作为一种光滑的物体,通常显示出较强的偏振现象,能够为海洋研究提供十分有价值的信息。相较于传统的红外强度仿真,红外偏振仿真技术结合了红外辐射与偏振信息,可以反映物体的材质、粗糙度等信息<sup>[2-3]</sup>,有

望弥补在目标与背景温差较小时传统红外辐射仿真难以分辨目标的不足<sup>[4]</sup>。因此,通过针对舰船尾迹的红外偏振仿真能够获取尾迹的红外偏振信息,进而识别并追踪舰船,对舰船探测具有重要意义。

国内外学者针对海洋偏振特性分析进行了大量研究。Sidran等测量了不同光谱波段水体的反射率和发射率,分析了水面粗糙度对发射率、反射率及偏振度的影响,并探讨了水体偏振效应在遥感领域的应用潜力<sup>[5]</sup>。Shaw等针对水体红外

发射引起的偏振度进行了研究, 计算了不同探测角度下海面偏振度的变化趋势<sup>[6]</sup>。张景华等对海水辐射、大气辐射与目标辐射进行了计算, 构建了一种长波红外偏振度计算模型, 并对海面的长波红外偏振进行了仿真及实验分析<sup>[7]</sup>。关于海面偏振现象的研究已经进行了多年, 针对海面尾迹场景的红外偏振传输仿真模型尚未见报道, 传统的红外偏振模型无法反应不同航速、海况对尾迹红外偏振特性的影响, 难以为复杂海况下的尾迹探测提供理论指导。

本文针对动态舰船尾迹红外偏振特性仿真分析难点, 提出基于线性叠加法建立粗糙海面尾迹几何模型, 结合微面元双向反射分布函数(BRDF)构建出适用于粗糙海面的舰船尾迹红外偏振传输模型, 更加全面地表征海面舰船尾迹的红外偏振特性。针对不同航速、风速等变量的尾迹进行红外偏振特性仿真, 分析航速、风速等变量影响尾迹红外偏振特性的机理, 总结不同变量下尾迹红外偏振特性的变化规律。最后, 将数学仿真结果与基于计算流体力学的仿真结果及尾迹实验图像进行对比, 以验证理论分析结果的正确性。本研究为海面场景动态舰船尾迹红外偏振特征的提取提供理论基础。

## 2 海面舰船尾迹红外偏振传输模型构建

### 2.1 基于微面元的双向反射分布函数

红外偏振辐射在海面的传输过程, 本质上是辐射能量与海面微面元发生散射、反射等相互作用并最终进入探测器的完整路径。在对目标表面的辐射传输路径进行分析时, 通常引入双向反射

分布函数 BRDF。BRDF 可以定量描述光在目标表面的散射特性, 其表达式为<sup>[8]</sup>:

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} (\text{sr}^{-1}) \quad (1)$$

其中  $E_i$  为入射光在物体表面的辐照度,  $L_r$  为物体表面出射光的辐照度,  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别为入射光和反射光的天顶角,  $\varphi_i$  和  $\varphi_r$  分别为入射光和反射光的方位角。  $\lambda$  为波长。

在对海面尾迹进行分析时, 通常将海面尾迹分解为大量微面元, 受到航速和海况的影响, 海面尾迹整体面型由许多高度不一的波浪组成, 这些波浪之间存在遮蔽效应, 组成海面尾迹的微面元的法线方向也不同。因此, 本文采用基于微面元的双向反射分布函数对海面尾迹进行分析, 考虑到粗糙海面海浪间的遮蔽效应, 在 BRDF 中引入遮蔽函数, 得到分析海面尾迹微面元法线的概率分布函数<sup>[9]</sup>:

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^2 \alpha} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / 2\sigma^2]}{\cos \theta_r \cos \theta_i} G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (2)$$

其中  $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  为遮蔽函数,  $\alpha$  为微面元法线方向与  $z$  轴的夹角,  $\sigma$  为物体表面粗糙度常数, 在对常规风速 ( $\leq 30 \text{ m/s}$ )<sup>[10]</sup> 下的海面场景进行分析时,  $\sigma$  可由 Cox-Munk 模型求得<sup>[11]</sup>:

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.005 12U_{12.5} \pm 0.004 \quad ,$$

其中  $U_{12.5}$  为海面上方 12.5 米处风速。

图 1 反映了微面元双向反射分布函数的几何关系, 其中  $z$  为天顶方向,  $n$  为微面元法线方向,  $\alpha$  表示天顶方向与微面元法线的夹角,  $\beta$  为入射光与微面元法线夹角。

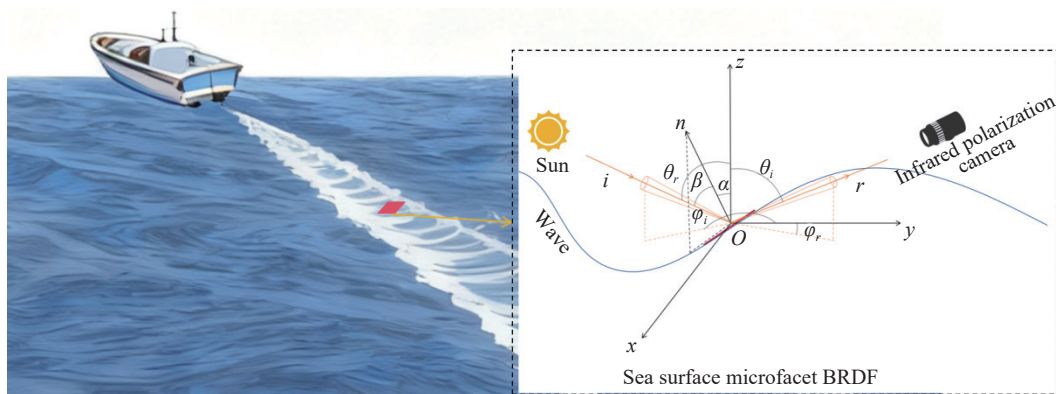


图 1 海面微面元双向反射分布函数示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Sea Surface Microfacet Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

### 3 粗糙海面红外偏振特性建模

斯托克斯矢量  $\mathbf{S}=[I \ Q \ U \ V]$  描述了光的偏振状态, 其中  $I$  为强度,  $Q$  为偏振光中垂直或水平向

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\alpha} \frac{\exp[-\tan^2\alpha/2\sigma^2]}{\cos\theta_r \cos\theta_i} G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \mathbf{M}_{jl}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r), \quad (j, l = 0, 1, 2, 3), \quad (3)$$

其中  $\mathbf{M}_{jl}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  为 Muller 矩阵中的元素,  $m_{00}$  为海面的总光强,  $m_{10}$  为水平光强与垂直光强之差,  $m_{20}$  为  $\pm 45^\circ$  光强之差,  $m_{30}$  为圆偏光的光强, 可以由菲尼尔反射定律求得。其中圆偏振分量自身强度极弱、对海面红外偏振辐射特性的贡献可以忽略, 因此在计算海面长波红外斯托克斯矢量时, 将其忽略<sup>[9]</sup>, 令  $m_{30} = 0$ ,

$$\begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s(\lambda, \theta_i) + R_p(\lambda, \theta_i) \\ \cos(2\eta_r)(R_s(\lambda, \theta_i) - R_p(\lambda, \theta_i)) \\ \sin(2\eta_r)(R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中  $R_s(\lambda, \theta_i)$  与  $R_p(\lambda, \theta_i)$  分别表示入射光的垂直反

$$E_r = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \iint_{\Omega_r} f_{00} \cos\theta_r d\Omega_r \\ \iint_{\Omega_r} f_{10} \cos\theta_r d\Omega_r \\ \iint_{\Omega_r} f_{20} \cos\theta_r d\Omega_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \exp(-(\tan^2\alpha/2\sigma^2))}{\cos^4\alpha \cos(\theta_i)} (R_s(\lambda, \theta_i) + R_p(\lambda, \theta_i)) \sin\theta_r d\theta_r d\varphi_r \\ \frac{1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \exp(-(\tan^2\alpha/2\sigma^2))}{\cos^4\alpha \cos(\theta_i)} \cos(2\eta_r)(R_s(\lambda, \theta_i) - R_p(\lambda, \theta_i)) \sin\theta_r d\theta_r d\varphi_r \\ \frac{1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \exp(-(\tan^2\alpha/2\sigma^2))}{\cos^4\alpha \cos(\theta_i)} \sin(2\eta_r)(R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)) \sin\theta_r d\theta_r d\varphi_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

在对海面进行探测时, 长波红外波段海面的辐射通常由以下几种辐射构成: 海面自身辐射、环境辐射、海面对环境辐射的反射、海面对太阳辐射的反射。因此探测器接收到的总辐射  $I_{\text{sea}}$  为:

$$I_{\text{sea}} = \tau_\lambda [\varepsilon \cdot I_{\text{sea-e}} + R(I_{\text{air}} + I_{\text{sun}})] + I_{\text{air}}, \quad (7)$$

其中  $I_{\text{sea-e}}$  为海水自发黑体辐射,  $I_{\text{air}}$  为环境辐射,  $I_{\text{sun}}$  为太阳辐射,  $\tau_\lambda$  为大气透过率,  $R$  为海面反射率,  $\varepsilon$  为海面发射率, 本文采用 MODTRAN 大气辐射模型, 大气透过率与环境辐射强度均由 MODTRAN 软件计算, 设置太阳温度为 5887 K, 海面温度 288 K。

偏振的比例,  $U$  表示偏振光中与垂直或水平方向呈  $45^\circ$  方向偏振的比例,  $V$  表示偏振光中圆偏振的比例。通过将 Muller 矩阵与微面元 BRDF 相结合, 可以将微面元 BRDF 代入到偏振模型的计算中<sup>[12]</sup>:

射率和平行反射率,  $\eta_r$  为坐标转换角, 是反射方向与天顶方向组成的平面  $roz$  反射方向与微面元法线组成的平面  $ron$  之间的夹角。

在对粗糙海面进行分析时, 需要考虑由海面高低不一的海浪引起的多角度反射, 要考虑光在整个半球区域的能量分布, 需要引入半球反射率<sup>[7]</sup>:

$$DF = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \sin\theta_r \cos\theta_r d\theta_r d\varphi_r, \quad (5)$$

通过以上公式, 可以求得半球空间内反射波的斯托克斯矢量为:

环境辐射由大气辐射和大气对太阳辐射的散射组成。当对海面的红外偏振特性进行分析时, 由于大气中分子运动方向不一, 总体表现为随机状态, 因此几乎不产生偏振现象, 对海面红外偏振几乎不产生贡献, 而太阳辐射主要集中在可见光与短波红外区间内, 长波红外区间内的太阳辐射对海面的偏振效应影响很小, 因此本文暂不考虑。在长波区间内, 不同角度入射的太阳辐射所产生的反射辐射对海面偏振的贡献存在显著差异: 非耀斑区域的太阳辐射远低于海面的自发辐射, 在特定角度入射的太阳辐射与海面形成的类似于镜面反射的耀斑区域中, 太阳辐射会产生强

烈的反射效应,此时太阳辐射在海面偏振效应中占主要地位<sup>[13-15]</sup>。因此,在分析非耀斑区域的海面辐射时,可以忽略海面对太阳辐射的反射。海面的红外偏振现象主要受到海面自身辐射和海面对环境辐射的反射影响,因此本文在对海面红外偏振现象

进行讨论时,主要考虑海面自身辐射和海面对环境辐射的反射,忽略环境辐射和海面对太阳辐射的反射<sup>[16]</sup>。

当环境辐射入射到海面产生反射时会产生偏振效应,而不同的入射角会产生不同的偏振效应,同样的,海水自身的黑体辐射产生的偏振效应也会随着微面元法线方向的不同而产生变化。因此海面的偏振特性受到海面粗糙度影响,海面的粗糙度取决于海面微面元的斜率。海面尾迹受到波浪影响,其总体高度场由海面面型与尾迹面型所决定,将海面高度场与尾迹高度场叠加得到海面尾迹的高度场模型:

$$\zeta_{\text{total}} = \zeta_{\text{wake}} + \zeta_{\text{sea}}, \quad (8)$$

$$I_r = \tau_\lambda \left[ I_w + \frac{(I_{\text{air}} - I_{\text{sea-e}})}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\left( \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}} \right)^4} \frac{\exp\left[-\tan^2\left(\arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}}\right)}\right)/2\sigma^2}{\cos\theta_i} \sin\theta_r (R_s + R_p) d\theta_r d\varphi_r \right], \quad (11)$$

$$Q_r = \tau_\lambda \left[ \frac{(I_{\text{air}} - I_{\text{sea-e}})}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\left( \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}} \right)^4} \frac{\exp\left[-\tan^2\left(\arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}}\right)}\right)/2\sigma^2}{\cos\theta_i} \cos(2\eta_r) \sin\theta_r (R_s - R_p) d\theta_r d\varphi_r \right], \quad (12)$$

$$U_r = \tau_\lambda \left[ \frac{(I_{\text{air}} - I_{\text{sea-e}})}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\left( \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}} \right)^4} \frac{\exp\left[-\tan^2\left(\arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}}\right)}\right)/2\sigma^2}{\cos\theta_i} \sin(2\eta_r) \sin\theta_r (R_p - R_s) d\theta_r d\varphi_r \right], \quad (13)$$

式中 $\zeta_{\text{sea}}$ 为尾迹高度场, $\zeta_{\text{wake}}$ 为海面高度场。

分别对 $x$ 和 $y$ 两个方向求偏导,可以得到微面元法线方向与 $z$ 轴的夹角:

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\zeta_{\text{total}}}{\partial y}\right)^2 + 1}}, \quad (9)$$

根据基尔霍夫热辐射定律可知,热平衡条件下物体的吸收率等于其发射率,因此由公式(6)表示的定向半球反射率可以求得微面元在半球空间内的发射率:

$$\varepsilon = 1 - E_r = \begin{bmatrix} 1 - \iint_{\Omega_r} f_{00} \cos\theta_r d\Omega_r \\ - \iint_{\Omega_r} f_{10} \cos\theta_r d\Omega_r \\ - \iint_{\Omega_r} f_{20} \cos\theta_r d\Omega_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

将式(7)和式(9)代入到式(10)中,可以得到海面舰船尾迹的红外传输模型的斯托克斯矢量:

于是得到海面舰船尾迹红外偏振传输模型:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I_r \\ Q_r \\ U_r \\ V_r \end{bmatrix}, \quad (14)$$

托克斯矢量, 可以求得海面背景下舰船尾迹的红外偏振度为:

$$P = \frac{\sqrt{Q_r^2 + U_r^2}}{I_r}, \quad (15)$$

同理, 根据式(11)、(12)、(13)可求得海面背景下舰船尾迹的红外偏振角为:

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U_r}{Q_r}\right), \quad (16)$$

根据式(15)与式(16)可以求得海面舰船尾迹的红外偏振度与红外偏振角。红外偏振度能够反映尾迹与海面偏振程度的差异。根据式(8)与式(15)可知, 风速与航速等变量会对海面尾迹的粗糙程度产生影响, 风速越大, 海面尾迹的粗糙度越大, 使得海面微面元法线方向与天定方向的夹角越大, 偏振度越小。红外偏振角对海面微面元的法线方向极为敏感, 能够反映出海面尾迹的纹理特征。根据式(8)与式(16)可知, 海面粗糙度越大, 偏振角越小。

#### 4 海面背景下开尔文尾迹仿真

海洋表面的波浪是由风力产生的风生重力波, 受到风速与风向的调制, 由于海面上方风速与风向的不断变化, 真实海面通常极为复杂, 可视为一个随机过程。对于海洋表面的仿真通常使用线性叠加法<sup>[17]</sup>, 即将海洋表面的波动视为一系列不同振幅, 不同波长, 不同相位的波的叠加, 其呈现出复杂的变化特性。海浪谱作为随机海面的重要统计性质, 包含了组成海面波浪的能量在空间和频率上的分布, 对海面仿真具有重要意义。

本文采用 Pierson-Moscowit 谱, 即 P-M 谱对粗糙海面进行仿真, P-M 谱属于重力引力谱, 适用于完全生长的海面, 是通过观测获得的纯经验谱, 与固定风速下海面的稳态分布较为符合, 适用于由风产生影响无限广阔的稳态海面, 海谱表达式为<sup>[18]</sup>:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right), \quad (17)$$

式中  $\omega_p$  表示海谱的峰值, 一般表示为  $\omega_p = 0.855g/U_{10}$ ,  $U_{10}$  表示海面上空十米处的风速大小, 结合风廓线理论可知  $U_{12.5} \approx 1.03 \times U_{10}$ <sup>[19]</sup>。式中  $\alpha = 0.0081$ ,  $g$  为重力加速度取  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

模拟得到海面背景波高结果如图 2 所示。

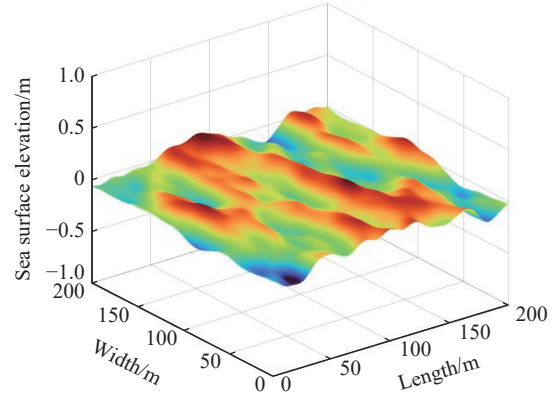


图 2 粗糙海面高度场

Fig. 2 Height Field of Rough Sea Surface

舰船在海上航行的过程中, 会产生长达千米的开尔文尾迹, 开尔文尾迹的形态受船体长度、宽度、吃水深度和航速的影响。船体速度越大形成的稳态开尔文波的高度均值越大。开尔文尾迹在海洋长波红外探测领域被认为是船体目标探测与识别的重要特征, 因此在红外偏振场景的仿真中表现出舰船在海面上运动时产生的开尔文波有重要意义。现有文献中已有成熟的开尔文波高度场模型。通常的简化模型是将船体模型认为是简单的细长形船体, 船体的吃水外轮廓为抛物线, 匀速速度至稳定状态。此时由船体动力源扰动产生的波动会以  $x$  轴各点为波动源, 朝各个方向传播, 达到稳态时会形成与运动方向夹角为  $\chi$  的稳定波形态。对于一个船体半宽度为  $b$ , 半长度为  $l$ , 吃水深度为  $d$ , 其以速度  $v_s$  沿  $x$  轴方向匀速运动, 其形成的稳定开尔文波高度场为<sup>[20]</sup>:

$$\zeta(x, y) = \frac{4b}{\pi kl} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[ 1 - \exp(-kd \sec^2 \chi) \right] \cdot \sin \left[ k \sec^2 \chi (x \cos \chi + y \sin \chi) \right] d\chi, \quad (18)$$

式中  $k = g/v_s^2$ ,  $g$  为重力加速度。  $\chi$  表示尾迹波与船体运动方向的夹角。

在对海面尾迹进行仿真时, 海面受海浪与尾迹共同调制, 基于海面仿真的线性叠加法, 将尾迹

视作组成海面的波的一种, 将尾迹高度场与仿真得到的粗糙海面高度场线性叠加, 得到海面尾迹高度场仿真结果。给定舰船参数, 船体长度为 80 m, 宽度为 8 m, 吃水深度为 2.5 m, 当以 10 m/s 速度匀速运动时, 对形成的开尔文波稳态高度场分布进行仿真计算, 得到尾迹高度场与海面尾迹高度场分布如下: 由图 3 可知, 海浪与尾迹的共同调制使得海面尾迹的面型同时受到海面参数与尾迹参数的影响, 尾迹形态不变, 但高度受海浪影响产生变化, 尾迹内部的横断波因为与海浪相叠加, 在不同位置产生不同变化, 一些位置的横断波高度减小, 另一些位置的横断波高度增加, 使得尾迹内部产生破碎效果, 同时受到海浪影响使得海面的粗糙度增加。这些变化改变了海面尾迹微面元的法线方向, 进而影响了海面尾迹的红外偏振特性。

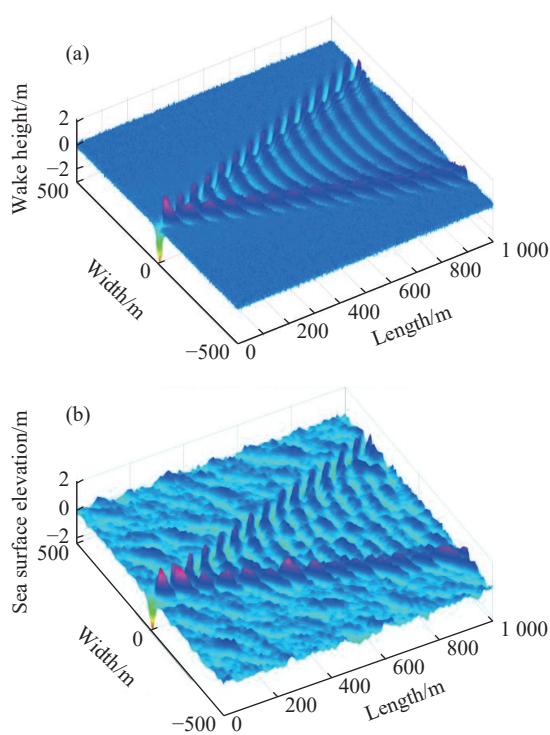


图 3 开尔文尾迹与海面舰船尾迹高度场仿真图 (a) 开尔文尾迹仿真图 (b) 海面尾迹仿真图

Fig. 3 Simulation Diagram of Height Field of Kelvin Wake and Ship Wake on the Sea Surface (a) Kelvin Wake Simulation Diagram (b) Ship Wake on the Sea Surface Simulation Diagram

## 5 海面舰船尾迹红外偏振特性仿真分析

基于上述理论建模, 使用仿真软件基于公式

(14)、公式(15)与公式(16)对海面舰船尾迹的红外偏振特性进行仿真分析。在舰船航行的过程中, 尾迹受到航速、吃水深度等因素的影响, 同时, 不同的风速与风向会产生不同的海浪, 这些海浪也会对面尾迹的红外偏振特性造成影响。因此, 对选择航速、吃水深度、风速、风向作为变量进行海面舰船尾迹的红外偏振特性仿真。

选取天顶角  $50^\circ$ , 风速为 10 m/s, 风向为  $45^\circ$ , 航速  $v_s$  分别为 5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 的尾迹进行红外偏振特性的仿真分析, 得到如图 4 所示的仿真图像。分析图 4, 随着航速的增加, 尾迹形态发生显著变化。当航速较低时, 尾迹的红外强度辐射与海面辐射接近, 红外原图的尾迹难以被探测, 红外偏振度图像中的尾迹探测效果强于红外原图, 红外偏振角图像中的尾迹最明显。当航速为 10 m/s 时, 尾迹的红外偏振度与红外偏振角的探测效果显著强于红外原图, 此时尾迹区域的振幅较大, 在尾迹较高的区域, 产生类似镜面反射的效果, 偏振度较强, 在尾迹较低的区域, 反射退偏较强, 偏振度较低。因此, 较大的振幅使得此区域内的对比度较高, 红外偏振度图中的尾迹具备内部横断波等细节, 探测效果最好, 红外偏振角图中尾迹的开尔文臂与海面的对比度最高, 但缺乏内部细节。随着航速增加, 尾迹的探测效果越来越差, 这是因为当航速增加时, 尾迹的波峰与波谷的差值增加, 但同时也增大了波峰与波谷的间距, 使得尾迹变得平缓, 尾迹的探测效果减弱。根据式(15)可知, 航速增大时, 尾迹的振幅增大, 波长增大, 波峰与波谷之间的倾斜程度减小。当航速为 15 m/s 至 20 m/s 间时, 尾迹的红外偏振度的探测效果强于偏振角的探测效果, 后者在航速为 20 m/s 及 25 m/s 时几乎难以辨认尾迹, 同时存在严重的噪声。

图 5 为各偏振图像开尔文臂对比度随航速变化图。随着航速增加, 各偏振图中尾迹开尔文臂的对比度先增大再减小, 其中 U 图像与 AOP 图像的对比度高于其他图像, 各航速 AOP 图像的对比度相比于红外原图增加了 500%, DOLP 的对比度相较于红外原图增加了 322%。但 U 图像与 AOP 图像中的尾迹缺乏内部细节, 且噪声较大, 对尾迹开尔文臂的对比度产生影响, 探测效果弱于 DOLP。

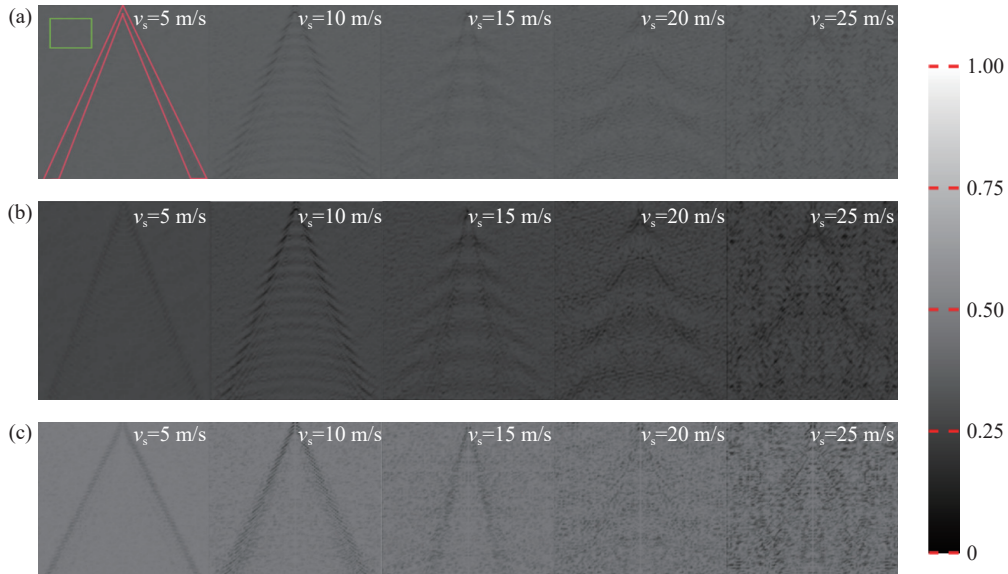


图 4 尾迹红外偏振特性随航速变化图。(a).尾迹红外强度仿真图 (b).尾迹红外偏振度仿真图 (c).尾迹红外偏振角仿真图

Fig. 4 Variation Diagram of Infrared Polarization Characteristics of Wake with Ship Speed(a) Wake Infrared Intensity Simulation Diagram (b) Wake Infrared DOLP Simulation Diagram (c) Wake Infrared AOP Simulation Diagram

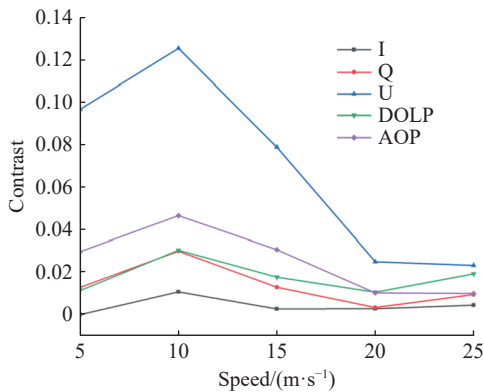


图 5 各偏振图像开尔文臂对比度随航速变化图

Fig. 5 Variation Diagram of Contrast of Kelvin Arms in Various Polarization Images with Ship Speed

选取天顶角  $50^\circ$ , 航速为 10 m/s, 风向为  $45^\circ$ , 风速  $U_{10}$  分别为 10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s、30 m/s 的尾迹进行红外偏振特性的仿真分析, 得到如图 6 所示的仿真图像。分析图 6, 红外偏振度与偏振角的探测效果均强于红外原图。随着风速的增加, 尾迹的形态几乎保持不变, 海面出现更多大尺度波浪, 这些波浪淹没尾迹导致尾迹的探测效果变差。结合公式(1)与公式(14), 风速增大, 海面浪高增大, 波浪的倾斜程度增大, 噪声区域的偏振度与偏振角与非噪声区域的偏振度与偏振角的对比度增强, 淹没尾迹。当风速小于 25 m/s 时, 尾迹红外偏振度图像中能够看见尾迹内部细节, 而偏振角图像中的尾迹只能看见开尔文臂, 缺乏内部的横断波等细节, 探测效果弱于偏振度图,

当风速为 20 m/s 时, 原图、偏振度图及偏振角图中均出现由海浪造成的明显的海面噪声, 当风速为 30 m/s 时, 尾迹的红外原图与红外偏振度图受海面噪声影响严重, 其中红外原图中的尾迹几乎难以辨认, 偏振角受到海面噪声的影响相对较弱, 此时偏振角的探测效果强于偏振度。

图 7 为各偏振图像开尔文臂对比度随风速变化图。随着风速增加, 开尔文尾迹的形态保持不变, 海面出现更多更大尺度的波浪, 海面噪声增大, 各偏振图中尾迹开尔文臂的对比度随风速增大而减小。各风速 AOP 图像平均对比度对比红外原图增加了 352%, 在风速为 0 m/s 时对比度提升最明显, 为 388%; DOLP 图像的平均对比度相较红外原图提升了 270%。

选取天顶角  $50^\circ$ , 航速为 10 m/s, 风速为 20 m/s, 风向分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$  的尾迹进行红外偏振特性的仿真分析, 得到如图 8 所示的仿真图像。分析图 8, 在所有风向下, 红外偏振度与偏振角的探测效果均强于红外原图。由公式(17)、公式(14)与公式(15)可知, 风向变化时, 海浪在尾迹传播方向的分量产生变化, 当海浪的传播方向与尾的传播方向一致时, 海浪对尾迹的振幅与倾斜程度产生的影响最大, 导致在偏振度图与原图中的尾迹被淹没。其中红外偏振度图像在风向为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时探测效果最差, 此时部分开尔文臂被横向的波浪所淹没, 尾迹内部的横断波几乎完全被淹没, 无法观测到。而在风向为  $90^\circ$  时,

红外偏振度的探测效果最好, 此时红外偏振度图像中可以清晰地观测到开尔文尾迹及其内部的横断波, 海面波浪几乎不造成影响。红外偏振度在风向为  $45^\circ$  及  $135^\circ$  时的探测效果相近, 部分横断波被淹没, 海浪对尾迹的探测效果造成一定影响。而红外偏振度图像中的尾迹在所有风向下都

观测不到尾迹尾部的横断波, 当风向为  $0^\circ$  与  $180^\circ$  时, 尾迹的红外偏振角的探测效果几乎不受海面波浪的影响, 此时红外偏振角的探测出效果强于偏振度, 当风向为  $45^\circ$  及  $135^\circ$  时, 红外偏振角图中的尾迹受到海面波浪噪声的影响, 当风向为  $90^\circ$  时, 影响达到最大。

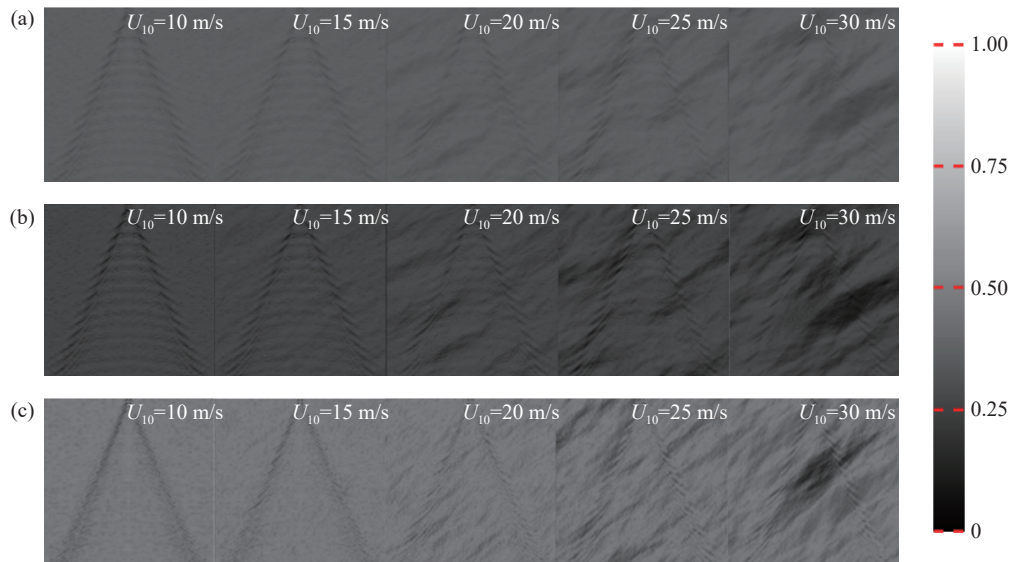


图 6 尾迹红外偏振特性随风速变化图。(a)尾迹红外强度仿真图 (b)尾迹红外偏振度仿真图 (c)尾迹红外偏振角仿真图

Fig. 6 Variation Diagram of Infrared Polarization Characteristics of Wake with Wind Speed (a) Wake Infrared Intensity Simulation Diagram (b) Wake Infrared DOLP Simulation Diagram (c) Wake Infrared AOP Simulation Diagram

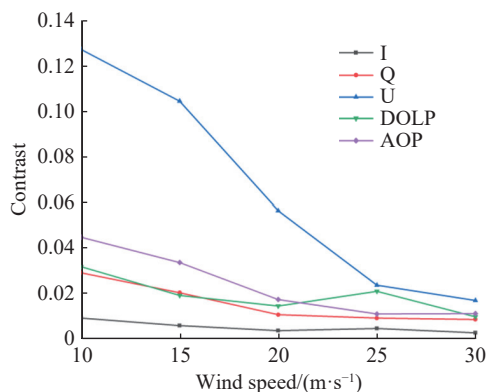


图 7 各偏振图像开尔文臂对比度随风速变化图

Fig. 7 Variation Diagram of Contrast of Kelvin Arms in Various Polarization Images with Wind Speed

图 9 为各偏振图像开尔文臂对比度随风向变化图。随着风向增加, 开尔文尾迹的形态保持不变, 海面波浪方向发生改变, U 图像和 AOP 图像中开尔文臂的对比度随风向的变化先减小后增大, 在风向为  $90^\circ$  时达到最小, Q 图像、DOLP 图像和红外原图中开尔文臂的对比度随风向的变化先增大后减小, 在风向为  $90^\circ$  时达到最大。各风向 AOP 图像平均对比度对比红外原图增加了

398%, 在风向为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时对比度提升最明显, 风向为  $0^\circ$  时, 对比度提升了 618%; 风向为  $180^\circ$  时, 对比度提升了 1115%。DOLP 图像的平均对比度相较红外原图提升了 233%。

选取天顶角  $50^\circ$ , 航速为 10 m/s, 风速为 10 m/s, 风向为  $45^\circ$ , 吃水深度  $d$  分别为 1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、3.5 m 的尾迹进行红外偏振特性的仿真分析, 得到如图 10 所示的仿真图像。分析图 10, 在所有吃水深度下, 红外偏振度与偏振角的探测效果均强于红外原图。随着吃水深度增加, 尾迹整体形态不发生变化, 尾迹的振幅随着吃水深度的增加而增加, 尾迹区域的粗糙度随吃水深度的增加而增加, 红外原图、红外偏振度图与红外偏振角图中的尾迹探测效果都有所增强。结合公式 (8) 与公式 (14) 可知, 吃水深度增加导致尾迹振幅增大, 尾迹波长不变, 倾斜程度增加, 在波谷区域的反射退偏与遮蔽效应增强, 使得尾迹的对比度增强。红外偏振度图像中的尾迹内部细节清晰, 探测效果最好。红外偏振角图像中的尾迹随着吃水深度的增加, 尾迹的开尔文臂呈现出更多的细节。

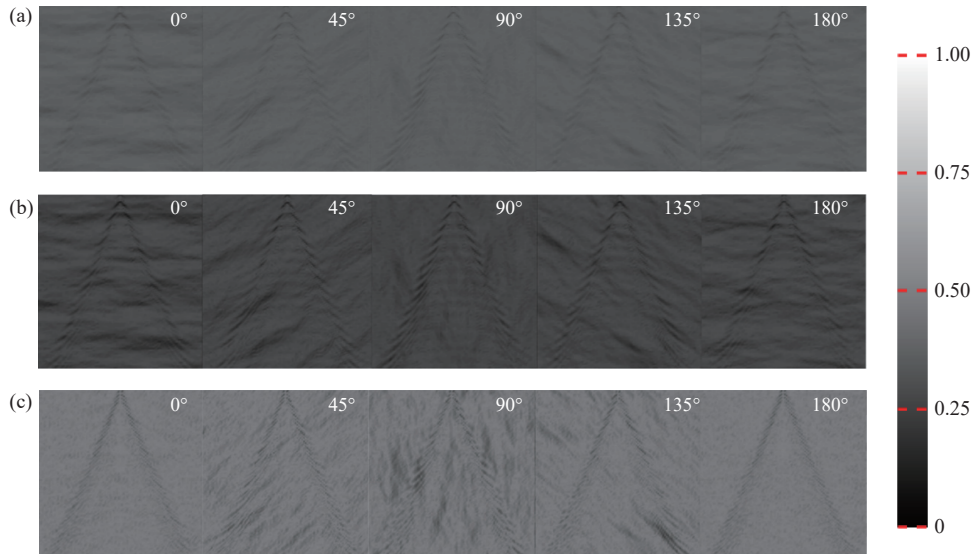


图 8 尾迹红外偏振特性随风向变化图。(a)尾迹红外强度仿真图 (b)尾迹红外偏振度仿真图 (c)尾迹红外偏振角仿真图

Fig. 8 Variation Diagram of Infrared Polarization Characteristics of Wake with Wind Direction (a) Wake Infrared Intensity Simulation Diagram (b) Wake Infrared DOLP Simulation Diagram (c) Wake Infrared AOP Simulation Diagram

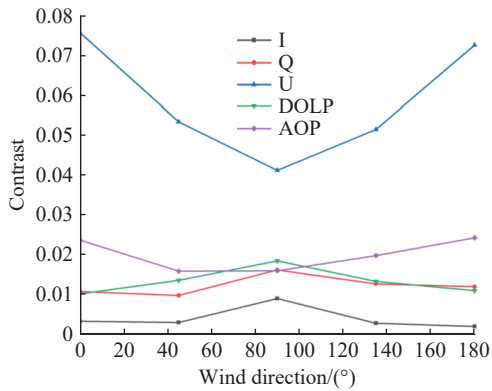


图 11 为各偏振图像开尔文臂对比度随吃水深度变化图。随着吃水深度增加,开尔文尾迹的形态保持不变,开尔文尾迹的振幅增加,各图像的开尔文臂对比度随吃水深度增加而增加,其中红外原图的增速小于其他图像。AOP 图像在各吃水深度下的平均对比度相较于红外原图增加了 258%, DOLP 图像的平均对比度相较于红外原图增加了 159%。

图 9 各偏振图像开尔文臂对比度随风向变化图

Fig. 9 Variation Diagram of Contrast of Kelvin Arms in Various Polarization Images with Wind Direction

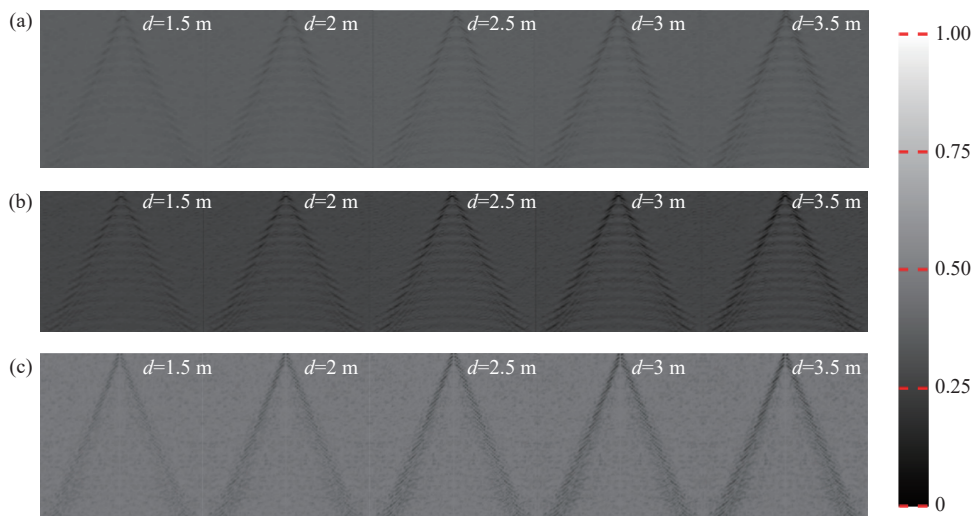


图 10 尾迹红外偏振特性随吃水深度变化图。(a)尾迹红外强度仿真图 (b)尾迹红外偏振度仿真图 (c)尾迹红外偏振角仿真图

Fig. 10 Variation Diagram of Infrared Polarization Characteristics of Wake with Draft Depth (a) Wake Infrared Intensity Simulation Diagram (b) Wake Infrared DOLP Simulation Diagram (c) Wake Infrared AOP Simulation Diagram

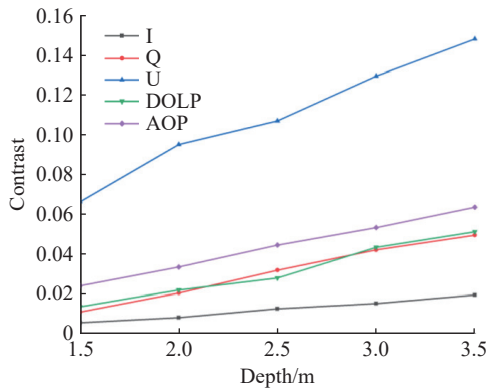


图 11 各偏振图像开尔文臂对比度随吃水深度变化图  
Fig. 11 Variation Diagram of Contrast of Kelvin Arms in Various Polarization Images with Draft Depth

## 6 流体仿真与实验验证

根据本文提出的海面舰船尾迹红外偏振传输模型, 使用流体仿真软件对海面舰船尾迹的红外偏振特性进行基于计算流体力学的仿真, 将仿真得到的原图、偏振度图与偏振角图与数学仿真进

行对比, 验证尾迹形态的真实性。

设置船长 5 m, 宽 2 m, 吃水深度 0.4 m, 航速 10 m/s, 风向为 45°方向, 风速 10 m/s, 流体仿真与数学仿真所用网格数均为 100×100。由图 12 可知, 基于式(18)的数学仿真尾迹与流体仿真尾迹在形态与灰度分布上有较高相似度, 但流体仿真的偏振角图像能够观察到尾迹区域的更多细节, 探测效果优于原图与偏振度图, 而数学仿真的偏振角图相较原图与偏振度图也可以观察到更多细节, 但细节被噪声淹没难以捕捉, 探测效果较弱。在数学仿真过程中, 开尔文尾迹高度场模型会调制整个海面, 在尾迹以外的区域产生一定程度的噪声, 在对大尺度海面进行仿真时, 这种噪声几乎不造成影响, 但当仿真的海面尺度较小或舰船航速过快时, 尾迹模型产生的噪声会产生较为明显的影响。相较于原图与偏振度图, 偏振角对目标表面纹理的改变更为敏感, 受到噪声影响更强, 导致数学仿真的偏振角图像在小尺度海面与流体仿真存在差异。

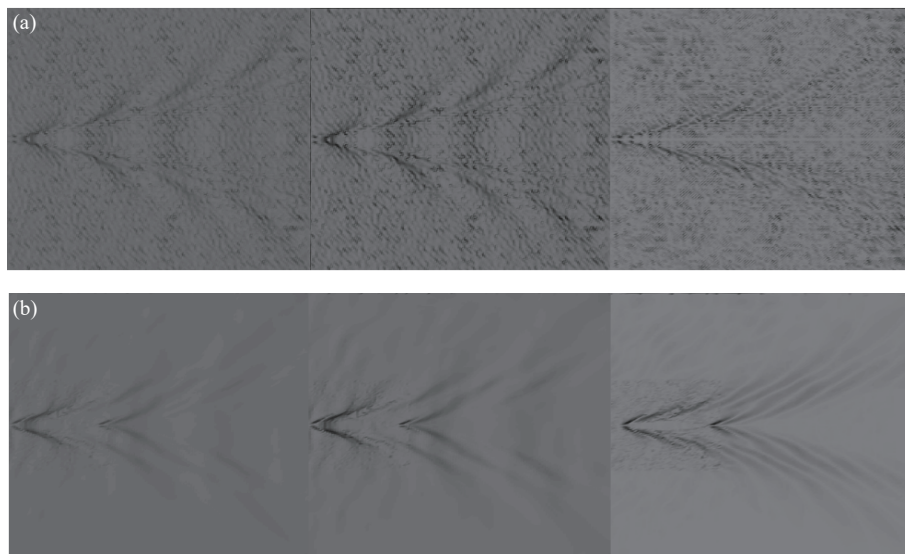


图 12 尾迹红外偏振特性随吃水深度变化图。(a) 数学仿真效果图 (b) 流体仿真效果图

Fig. 12 Variation Diagram of Infrared Polarization Characteristics of Wake with Draft Depth (a) Mathematical Simulation Results (b) Fluid Simulation Results

采用多种评价系数结合的方法对图 12 的相似程度进行验证, 使用巴氏系数验证两张图中灰度分布的重叠程度; 使用皮尔逊相关系数验证两张图像中目标形状的相关程度; 使用直方图相交系数验证两张图像的重叠面积; 使用卡方分布系数验证两图的灰度分布差异, 以上四种系数范围均为 0—1, 当计算结果为 1 时, 表示二者相

同。取四种评价系数的平均值作为图像的相似度, 得到如下表格:

由表 1 可知两种仿真结果具有较高相似度, 红外原图、红外偏振度图与红外偏振角图相似度均优于 95.7%。表明数学仿真所用模型与物理仿真模型具有相同趋势, 海面舰船尾迹红外偏振传输模型具有较高合理性。

表 1 仿真图像评价函数计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Evaluation Functions for Simulated Images

Types of Evaluation Functions	Bhattacharyya Coefficient	Pearson Correlation Coefficient	Histogram Intersection Coefficient	Chi-Square Coefficient	Similarity
Infrared Original Image	0.992	0.999	0.988	0.971	0.988
Infrared DOLP Image	0.989	0.995	0.981	0.946	0.978
Infrared AOP Image	0.976	0.981	0.961	0.911	0.957

观察图 13 可知, 实拍图中尾迹能够观察到明显的横断波与开尔文臂, 其形态与仿真得到的尾迹形态相吻合, 尾迹的横断波处(即尾迹的波谷)存在反射退偏导致的灰度值较低的现象, 尾迹区域其灰度值与仿真结果相似度较高。红外偏振度图像中尾迹目标信号强于红外偏振原图, 与仿真结果一致。比较红外原图与偏振度图的对比度, 偏振度图中开尔文臂对比度较红外原图增强

35%, 低于仿真结果, 这是由于实验场景为静态水面, 未引入由水面波纹产生的噪声, 同时, 未对探测角、天气、水体成分与水面杂质等变量进行控制, 导致尾迹外部区域与仿真图像存在一定差异, 同时, 仿真模拟的是理想器件在理想环境下的实验, 而现实中的器件存在如消光比有限等问题, 进一步降低了偏振度对原图的提升效果。

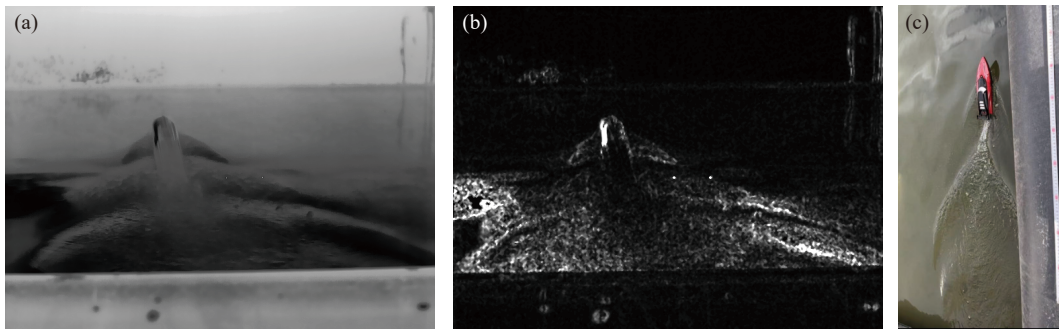


图 13 尾迹外场实验图。(a) 红外偏振原图 (b) 红外偏振度图 (c) 实验现场图

Fig. 13 Field experiment images of the wake. (a). Infrared polarization raw image; (b). Infrared degree of polarization image; (c). Experimental field diagram.

## 7 结 论

本文对海面舰船尾迹红外偏振辐射的传输路径进行了分析, 根据 P-M 海谱模型与开尔文尾迹模型, 结合微面元双向反射分布函数 BRDF 建立了海面舰船尾迹红外偏振传输模型。基于此模型对海面舰船尾迹的红外偏振特性进行了不同航速、不同风速、不同风向和不同吃水深度下的仿真。仿真结果表明, 不同航速下尾迹 DOLP 图像的平均对比度较红外原图增加了 322%, AOP 图像平均对比度较原图增加了 500%; 不同风速下尾迹 DOLP 图像的平均对比度较红外原图增加了 270%, AOP 图像平均对比度较原图增加了 352%; 不同风向下尾迹 DOLP 图像的平均对比度较红

外原图增加了 233%, AOP 图像平均对比度较原图增加了 398%; 不同吃水深度下尾迹 DOLP 图像的平均对比度较红外原图增加了 159%, AOP 图像平均对比度较原图增加了 258%。通过流体仿真对仿真结果进行了验证, 二者在尾迹形态与灰度分布相似度优于 95.7%, 将仿真结果与实验图像进行对比, 二者的尾迹形态与尾迹区域的灰度分布较为相似。结果表明该模型能够针对不同海面背景下的尾迹红外偏振度、偏振角进行有效计算, 为海洋场景下尾迹的红外偏振探测提供了有力依据。基于本研究构建的红外偏振传输模型及仿真验证结果, 后续将进行外场试验, 控制航速、风速等变量, 进一步掌握航速、风速等变量影响海面尾迹红外偏振特性的机理, 验证相关理论。

## 参考文献:

- [1] 钟一凡, 李丽圆, 陶天宇, 等. 热红外遥感影像的全天时舰船尾迹检测方法 (特邀)[J]. *光学学报*, 2025, 45(12): 1228004.  
ZHONG Y F, LI L Y, TAO T Y, *et al.*. All-weather ship wake detection method in thermal infrared remote sensing images (invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(12): 1228004. (in Chinese).
- [2] 杨晨南, 付跃刚, 欧阳名钊, 等. 高温金属表面红外辐射偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2025, 45(6): 1557-1565.  
YANG CH N, FU Y G, OUYANG M ZH, *et al.*. Polarization characteristics of infrared radiation on high-temperature metal surfaces[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2025, 45(6): 1557-1565. (in Chinese).
- [3] 王文轩. 天空背景下目标红外偏振特性建模及实验分析研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.  
WANG W X. *Modeling and experimental analysis of infrared polarization characteristics of targets in the sky background*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025. (in Chinese).
- [4] 解聪, 袁航, 柴国贝, 等. 海面背景下气动加热目标在轨红外偏振成像特征预测及仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(11): 20240222.  
XIE C, YUAN H, CHAI G B, *et al.*. Prediction and simulation analysis of infrared polarization imaging characteristics of aerodynamic heating targets in orbit under sea background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(11): 20240222. (in Chinese).
- [5] SIDRAN M. Broadband reflectance and emissivity of specular and rough water surfaces[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(18): 3176-3183.
- [6] SHAW J A. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3157-3165.
- [7] 张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(5): 586-594.  
ZHANG J H, ZHANG Y, SHI ZH G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 586-594. (in Chinese).
- [8] 张志远, 陈洪耀, 黄文薪, 等. 漫反射板 BRDF 特性及其对星上定标的影响分析[J]. *光学学报*, 2025, 45(12): 1228013.  
ZHANG ZH Y, CHEN H Y, HUANG W X, *et al.*. Analysis of solar diffuser BRDF characteristics and their effect on on-board calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(12): 1228013. (in Chinese).
- [9] 柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 459-471.  
LIU Y, SHI H D, JIANG H L, *et al.*. Infrared polarization properties of targets with rough surface[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471. (in Chinese).
- [10] KUDRYAVTSEV V N, MAKIN V K. Aerodynamic roughness of the sea surface at high winds[M]//BAKLANOV A, GRISOGONO B. *Atmospheric Boundary Layers: Nature, Theory, and Application to Environmental Modelling and Security*. New York: Springer, 2007: 133-147, doi: 10.1007/978-0-387-74321-9\_10.
- [11] COX C S, MUNK W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *Journal of Marine Research*, 1954, 13(2): 198-227.
- [12] 叶敏锐, 崔文楠, 黄夏阳, 等. 浮空器平台海雾背景下红外偏振特性分析及作用距离建模[J]. *红外与毫米波学报*, 2025, 44(3): 459-468.  
YE M R, CUI W N, HUANG X Y, *et al.*. Analysis of infrared polarization characteristics and modeling of operating distance on aerostat platform in sea fog[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2025, 44(3): 459-468. (in Chinese).
- [13] 朱鹤骞, 曲宏松. 海面背景耀光的自适应抑制系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201006.  
ZHU H Q, QU H S. Adaptive suppression system of sea background flare[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1201006. (in Chinese).
- [14] 陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 等. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0529001.  
CHEN W, QIAO Y L, SUN X B, *et al.*. Method for water surface sun glint suppression based on polarized radiation image fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0529001. (in Chinese).

- [15] 刘鹏,倪新宇,段锦,等. 面向海面反光抑制的最优偏振探测角度估计[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(13): 2036-2055. LIU P, NI X Y, DUAN J, *et al.*. Optimal polarization detection angle estimation for sea surface glint suppression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(13): 2036-2055. (in Chinese).
- [16] COOPER A W, LENTZ W J, WALKER P L, *et al.*. Infrared polarization measurements of ship signatures and background contrast[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2223: 300-309.
- [17] 施伟,侯海平. 三维随机海浪模拟研究[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2006(4): 410-413. SHI W, HOU H P. Study on simulation of 3-D random waves[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2006(4): 410-413. (in Chinese).
- [18] 王亚博. 红外海面及舰船尾迹仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. WANG Y B. *Simulation research of infrared sea surface and ship wake*[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese).
- [19] MONIN A S, OBUKHOV A M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere[J]. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 2009, 24(151): 163-187. (查阅网上资料, 未找到本条文献刊名全写, 请确认).
- [20] WANG H, *et al.*. Spectral comparisons of ocean waves and Kelvin ship waves[C]. *Proceedings of the 7th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, ASME, 1988: 253-261. (查阅网上资料, 未找到本条文献全部作者信息, 请确认).

作者简介:



管沛豪(1998—),男,吉林吉林人,硕士,吉林吉林人,2021年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学设计,偏振成像方面的研究。E-mail: [2745744415@qq.com](mailto:2745744415@qq.com)



李英超(1966—),男,博士,正高级工程师,博士生导师,2012年获得长春理工大学博士学位,主要从事多维度光学特性测试与探测技术,先进光学成像测试方面的研究。E-mail: [13944068295@163.com](mailto:13944068295@163.com)