

文章编号 1004-924X(2020)06-1303-11

基于双向反射分布函数的海面红外偏振特性表征模型

张 弛, 吴 鑫*, 谢 建

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:针对红外波段下海面偏振特性建模的问题,在双向反射分布函数的基础上,建立了海面微面元的偏振双向反射分布函数模型。综合考虑了海面的自发辐射效应和反射效应对探测器接收辐射的影响,提出了一种新的海面红外偏振特性表征模型。利用 Elfouhaily 海浪谱和快速傅里叶变换计算了海面的高度场信息和斜率信息。数值计算了不同观测天顶角和不同风速下海面自发辐射的线性偏振度,以及不同入射天顶角下海面反射辐射的线性偏振度,仿真生成了海面和舰船的红外偏振图像。仿真数据与文献数据的对比分析表明,本文所建立的红外偏振特性模型适用于分析海面的红外偏振特性。与传统的红外强度图像相比,红外偏振图像可以提供更多关于海面的细节信息。同时,目标与海面的偏振特征差异更明显,对比度更高。所提出的海面红外偏振特性表征模型对海上目标的探测识别应用具有重要的意义。

关键词:偏振成像;红外波段;海面;偏振特性;偏振双向反射分布函数

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202806.1303

Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function

ZHANG Chi, WU Xin*, XIE Jian

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

* Corresponding author, E-mail: xwu@xidian.edu.cn

Abstract: Aiming to determine the polarization characteristics of the sea surface in the infrared wave band, a model of the polarization bidirectional reflection distribution function (pBRDF) for sea surface micro-elements was developed based on the micro-facet BRDF. Considering the effects of emission and reflection from a sea surface on the radiation received by the detector during radiation transmission, a novel model of sea surface infrared polarization characteristics was proposed. The elevation and slope of the sea surface could be captured using the Elfouhaily wave spectra and fast Fourier transforms (FFTs). Then, the degrees of linear polarization of sea surface emission and reflection radiation for different observation and incident zenith angles and for different wind speeds were calculated. Infrared polarization images of the sea surface and a ship were simulated. Through a comparative analysis of simulated data and the data obtained from the literature, the results show that the model established in this paper is suitable for investigating the infrared polarization characteristics of the sea surface.

收稿日期:2019-12-31;修订日期:2020-02-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61904138,61705179);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2019JQ-235)

Compared with infrared images based on light intensity information, the infrared polarization images provide more details about the sea surface. Meanwhile, the differences in polarization characteristics between the target and sea surface are clearer, and the contrast between the sea surface and target is higher. The model proposed in this paper is of significance in the detection of maritime targets in the infrared wave band.

Key words: polarized imaging; infrared wave band; sea surface; polarization characteristics; polarized bidirectional reflectance distribution function

1 引言

随着 CCD 技术和探测技术的发展,针对目标与背景的光学散射特性的研究被广泛地应用到目标识别^[1]、医学检测^[2]和计算机图形学^[3]等领域中。海面的光学散射特性是目标与背景光学特性研究的重要内容,受到了国内外学者的广泛关注。受到海面背景的影响,目标的光强信息常常淹没于背景中,降低了海上目标探测与识别的正确率与效率。例如,海面对太阳或天空辐射的反射会产生强烈的耀斑,当耀斑进入光学探测系统中时,产生的强烈杂波会严重影响成像效果,造成目标丢失。与光强探测相比,基于偏振信息的探测技术能够获得更多关于目标和背景的轮廓与细节信息。研究海面的偏振特性,可为海背景下的目标探测与识别、目标隐身与反隐身以及海上搜救等应用提供新的手段。

在红外波段,海面对太阳和天空散射所产生的太阳耀光以及海面的自发辐射存在着特定的偏振特性。太阳耀光和海面自发辐射的偏振方向和偏振强度有明显差异。Cooper^[4]和 Gregoris^[5]通过 Cox-Munk 波浪斜率模型分析了太阳耀光的偏振特性,并通过实验测量发现在红外偏振成像中,在中波红外波段,探测器接收的辐射主要来自海面耀光;在长波红外波段,接收的辐射主要来自海面的自发辐射。Shaw^[6]等的研究表明,海面的偏振发射率会随着观测角度、风速和波长等因素的变化而发生改变,但文中未涉及海面散射光的偏振特性研究。Chang^[7]等认为海面自发辐射的偏振度与观测角度以及粗糙度等因素有关,海面越粗糙,偏振度越低。但同样缺乏海面散射光的偏振特性建模和分析。

以往的研究表明,海面的红外偏振辐射特性与风速、海面的几何分布情况以及海水的介电特性等多种因素有关。由于实时监测与现场实验测量等研究手段会耗费大量的人力物力,为了减少研究成本和缩短研究周期,红外偏振成像建模与仿真技术是一种研究海面红外偏振辐射特性的有效手段。国外早在 2002 年就开始了对外红外偏振成像仿真的研究^[8-10],国内在偏振双向反射函数(polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function, pBRDF)理论^[11-12]与材料的偏振特性方面^[13-14]取得了一定的进展,但对海面的红外偏振特性研究较少,尤其是红外偏振成像仿真领域的研究则鲜有报道。

在研究海面光学性质的过程中,通常采用 Cox-Munk 模型^[10,15]对海面的斜率分布进行预测。Cox-Munk 模型中假设海面为高斯粗糙面,斜率方差、峰度和偏度等参数是基于海拔高度为 12.5 m 处的风速计算得出,所以当风速过大或过小时, Cox-Munk 模型中参数的不确定度增加^[16]。因此,在海面的红外偏振成像仿真研究中,建立一种符合实际海情的海面模型具有重要意义。与 Cox-Munk 模型相比,基于海浪谱和快速傅里叶变换的海面生成方法不仅可以获得海面的斜率信息,还可以获得海面的高度信息。目前,海浪谱主要有 Neumann 谱、PM 谱、Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱^[17]等。其中,Elfouhaily 谱是基于实测数据得到的,并且是一个全波数范围内的海浪谱,因此本文选用 Elfouhaily 谱。在红外波段,与海面几何尺寸相比,波长较小,需将海面分成许多微小面元。在偏振仿真成像过程中,大多数文献^[15,18]均将小面元近似看成光滑平面,仅考虑了镜面反射,忽略了其他方向上的散射,在相同面元数的情况下,这种方法较

为粗略。

本文提出将 pBRDF 模型和偏振自发辐射模型结合起来,建立了一种红外偏振辐射模型。首先,在海面光学特性表征时,本文将每个微小面元近似为有一定斜率分布的微粗糙面,这样更加符合实际情况,也提高了偏振仿真成像的效率,计算更加便捷。然后,通过数值计算得到了不同风速下偏振度随观测角的变化曲线,对比分析了不同风速对计算结果的影响。最后,建立中波红外偏振成像的仿真模型,生成了海面和船舰的红外偏振图像,并结合提出的红外偏振辐射模型对仿真图像进行了理论分析。该研究结果可以为海上目标探测、识别与分类等应用提供理论依据和数据支撑。

$$z(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_k=-N_x/2+1}^{N_x/2} \sum_{n_k=-N_y/2+1}^{N_y/2} \hat{z}(k_{m_k}, k_{n_k}) \cdot \exp[j(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)], \quad (1)$$

$$\hat{z}(k_{m_k}, k_{n_k}) = 2\pi [L_x L_y \Psi(k_{m_k}, k_{n_k})]^{1/2} \times \begin{cases} \frac{[N(0,1) + iN(0,1)]}{\sqrt{2}} & m_k \neq 0, N_x/2 \text{ 且 } n_k \neq 0, N_y/2 \\ N(0,1) & m_k = 0, N_x/2 \text{ 或 } n_k = 0, N_y/2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x$, $k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y$, $N(0,1)$ 表示均值为 0, 方差为 1 的高斯分布。方向海浪谱 $\Psi(k_{m_k}, k_{n_k})$ 的表达式为^[17]:

$$\Psi(k_{m_k}, k_{n_k}) = \frac{1}{2\pi k} S(k_{m_k}, k_{n_k}) [1 + \Delta(k_{m_k}, k_{n_k}) \cos 2\varphi], \quad (3)$$

其中: $S(k_{m_k}, k_{n_k})$ 为 Elfouhaily 海浪功率谱, φ 是海浪相对于风向的方向, $\Delta(k_{m_k}, k_{n_k})$ 是扩散函数。为使 $z(x_m, y_n)$ 为实数, 式中的傅里叶相位需满足: $\hat{z}(k_{m_k}, k_{n_k}) = \hat{z}^*(-k_{m_k}, -k_{n_k})$, $\hat{z}(k_{m_k}, -k_{n_k}) = \hat{z}^*(-k_{m_k}, k_{n_k})$ 。

斜率方差 σ^2 是描述海面粗糙程度的一个重要参数, 具体计算公式如下^[24]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_x} \frac{1}{N_y} \left\{ \sum_{m=-N_x/2+1}^{N_x/2-1} \sum_{n=-N_y/2+1}^{N_y/2} [\Delta_{xz}(x_m, y_n)]^2 + \sum_{m=-N_x/2+1}^{N_x/2} \sum_{n=-N_y/2+1}^{N_y/2-1} [\Delta_{yz}(x_m, y_n)]^2 \right\}, \quad (4)$$

其中:

$$\Delta_{xz}(x_m, y_n) = \frac{z(x_{m+1}, y_n) - z(x_m, y_n)}{\Delta x}, \quad (5)$$

$$\Delta_{yz}(x_m, y_n) = \frac{z(x_m, y_{n+1}) - z(x_m, y_n)}{\Delta y}. \quad (6)$$

风速分别为 3, 5, 10 m/s 时, 通过 FFT 海面

2 海面的生成

本文利用 Monte Carlo 方法模拟生成海面的高度场。Monte Carlo 法的基本思想是对白噪声进行傅里叶变换, 在频域对海面的功率谱进行滤波, 再进行傅里叶逆变换得到海面的高度场^[20]。设海面在 x 和 y 方向上的长度分别为 L_x 和 L_y , 等间隔离散点数分别为 N_x 和 N_y , 相邻点的距离分别为 $\Delta x = L_x / N_x$ 和 $\Delta y = L_y / N_y$ 。海面上每点的坐标可表示为 $x_m = m \cdot \Delta x$ 和 $y_n = n \cdot \Delta y$, 其中 $m = -N_x/2 + 1, \dots, N_x/2$ 且 $n = -N_y/2 + 1, \dots, N_y/2$ 。每点的海面高度 $z(x_m, y_n)$ 可表示为^[23]:

生成方法以及 Cox-Munk 模型计算得到的斜率方差 σ^2 以及绝对误差 δ 如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 本文 FFT 海面生成方法计算得到的 σ^2 与经验值吻合得较好, 当风速为 5 m/s 时, 绝对误差仅为 0.000 2。

表 1 不同风速下的斜率方差 σ^2 和绝对误差 δ

Tab. 1 Slope variance σ^2 and absolute error δ with different wind speeds

Wind speed/ (m · s ⁻¹)	σ^2		δ
	Cox-Munk	FFT	
3	0.018 36	0.021	0.002 64
5	0.028 6	0.028 8	0.000 2
10	0.054 2	0.052	0.002 2

3 海面的红外偏振辐射模型

3.1 基于 pBRDF 的反射偏振模型

BRDF 可以表示为散射辐亮度与入射辐照度的比值^[25]:

$$f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (7)$$

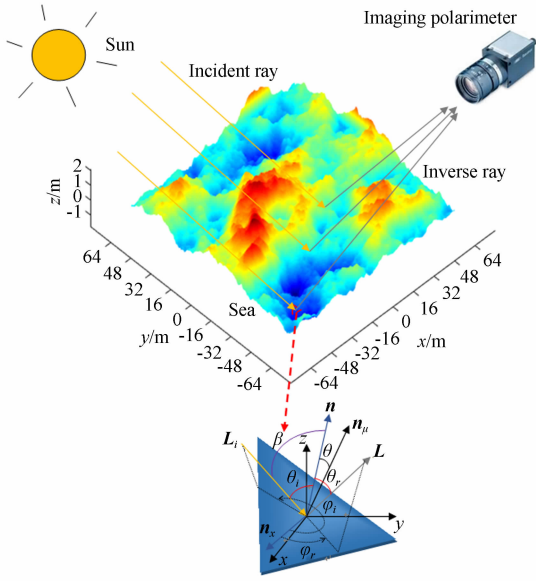


图 1 海面坐标系和微面元坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of sea surface and single microfacet

式中: θ_i 和 φ_i 分别是入射光的天顶角和方位角; θ_r 和 φ_r 分别是散射光的天顶角和方位角; L_r 是散射辐亮度; E_i 是入射辐照度。真实的海面是大量微小面元的集合体, 受到风速的影响, 海表面存在着高低起伏不定的波浪, 因此这些微小面元的法线方向各异。菲涅尔定律和斯涅尔定律不能直接应用到海面的 BRDF 计算中, 必须考虑不同微面元对散射光的不同贡献。图 1 为海面坐标系和微面元坐标系。其中, \mathbf{n} 是粗糙面的法线, \mathbf{n}_μ 是微面元的法线, \mathbf{n}_r 是粗糙面本地坐标系的 x 轴; θ 是微面元法线与粗糙面表面法线的夹角; β 是微面元上法线与入射光的夹角; θ 和 β 可由球面三角几何得到^[21]:

$$\cos 2\beta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r), \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta}. \quad (9)$$

偏振的 pBRDF 在标量的 BRDF 基础上发展而来, 描述了材质对不同偏振方向的光的反射特性, 可以表示为^[25]:

$$\mathbf{F}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{d\mathbf{L}_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{d\mathbf{E}_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{L}_r 和 \mathbf{E}_i 分别是反射辐亮度和入射辐照度的矢量形式。根据微面元理论, 通过将标量 BRDF 函数与 4×4 Mueller 矩阵 \mathbf{M} 作用可以得到 \mathbf{F} 的

具体表达式^[25]:

$$\mathbf{F}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{\exp(-\tan^2 \theta / 2\sigma^2)}{8\pi\sigma^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \cos^4 \theta} \cdot S_h(\theta_i, \theta_r, \sigma) \cdot \mathbf{M}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda), \quad (11)$$

式中 Mueller 矩阵的各分量 M_{ij} 可由琼斯矩阵各分量推出, 文献[21]给出了 M_{ij} 的表达式。 S_h 为遮挡函数, 其表达式^[26]为:

$$S_h(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \frac{1}{1 + \Lambda(\theta_i) + \Lambda(\theta_r)}, \quad (12)$$

$$\Lambda(x) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sigma}{\cos x} \exp\left(\frac{-\cot^2 x}{\sigma^2}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\cot x}{\sigma}\right) \right\}. \quad (13)$$

其中: θ_i 和 θ_r 分别为入射光和反射光的天顶角, $\operatorname{erfc}(x)$ 是互补误差函数。考虑到红外波段海水对辐射的衰减很大, 经过多次反射并被探测器接收到的漫反射光所占的比重极少, 故 \mathbf{F} 中未包含漫反射部分。

3.2 偏振辐射模型

来自海面的红外辐射由两部分组成: 海面对太阳以及天空的反射辐射 L_r 和海面的自发辐射 L_e , 不考虑大气对辐射传输的影响, 探测器接收到的红外辐射 L_d 表示^[15]为:

$$\mathbf{L}_d = \mathbf{L}_r + \mathbf{L}_e, \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_r = \mathbf{L}_{\text{sun},r} + \mathbf{L}_{\text{sky},r}, \quad (15)$$

其中, \mathbf{L}_r 由海面对太阳的反射辐射 $\mathbf{L}_{\text{sun},r}$ 和海面对天空的反射辐射 $\mathbf{L}_{\text{sky},r}$ 两部分组成。不同波段下, 海面对太阳的反射和对天空的反射所占的比重不同。在中波波段, 主要是对太阳的反射^[22]。因此, 式(14)可以简化为:

$$\mathbf{L}_d = \mathbf{L}_{\text{sun},r} + \mathbf{L}_e, \quad (16)$$

其中^[18-19]:

$$\mathbf{L}_{\text{sun},r} = \mathbf{F}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \cdot E(\theta_{\text{in}}, \varphi_{\text{in}}, \lambda) \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (17)$$

$$\mathbf{L}_e = \epsilon_{\text{sea}} \cdot L_{\text{BB}}(\lambda, T), \quad (18)$$

式中: $\mathbf{L}_{\text{sun},r}$ 是海面反射的太阳光谱辐亮度, \mathbf{S}_{in} 是入射的 Stokes 矢量, $E(\theta_{\text{in}}, \varphi_{\text{in}}, \lambda)$ 为入射到海面上的太阳光谱辐照度, $L_{\text{BB}}(\lambda, T)$ 是与海面温度 T 相同的黑体辐射亮度, 其表达式如下^[27]:

$$L_{\text{BB}}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (19)$$

式中: 第一辐射常数 $C_1 = 3.741\ 6 \times 10^8$ ($\text{W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$), 第二辐射常数 $C_2 = 1.438\ 8 \times 10^4$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)。

由于海水对红外辐射的衰减很大, 可以将海水看成是不透明的, 因此根据基尔霍夫定律, 发射与反射是相关的。当海水处于局部热平衡状态时, 能量达到守恒状态, 吸收和发射相等。海水的发射率 ϵ_{sea} 与理想黑体发射率 ϵ_{bb} 的关系^[19,28] 如下:

$$\epsilon_{\text{sea}} = \left[1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{F}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \right] \cdot \epsilon_{\text{bb}}, \quad (20)$$

式中: $d\Omega_i$ 是单位立体角。理想黑体辐射是非偏振的, 黑体发射率可以表示为 $\epsilon_{\text{bb}} = [1, 0, 0, 0]^T$ 。因此可得出海面的红外发射率的表达式^[19,28] 为:

$$\epsilon_{\text{sea}} = \begin{bmatrix} 1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{00} \cdot \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{10} \cdot \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{20} \cdot \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{30} \cdot \cos \theta_i d\Omega_i \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中: F_{00}, F_{10}, F_{20} 和 F_{30} 分别为矩阵 \mathbf{F} 中对应分量。

在传统的光线跟踪方法中, 需将二维随机粗糙海面划分为不同的单个微小面元, 并将每个微面元近似当作镜面。为了有效地描述海面的纹理特征, 需要采用更精确的几何划分方式, 这势必会增大计算时间。为了提高计算效率, 本文对每个微小面元采用 pBRDF 模型进行计算, 将单个面元散射贡献进行叠加, 得出总的接收辐射为:

$$\mathbf{L}_d^{\text{total}} = \frac{1}{2A} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(\mathbf{L}_r^{ij} + \mathbf{L}_e^{ij}) \Delta x \Delta y], \quad (22)$$

式中: A 为生成的二维随机海面的面积, M 和 N 分别为在 x 轴和 y 轴上的三角面元个数。

4 仿真结果

由式(14)可知, 在红外波段下, 探测器接收到的偏振信息受反射的辐射和自发辐射共同影响。当入射方位和探测方位确定后, 可分别计算出特定入射几何和观测几何条件下的反射辐射亮度向量 $\mathbf{L}_{\text{sun},r}$ 和自发辐射亮度向量 \mathbf{L}_e , 进一步可计算海面自发辐射的偏振度 DOLP^e 和海面反

射辐射的偏振度 DOLP^r 。为了验证理论模型中自发辐射模型和 pBRDF 模型的有效性, 分别计算了海面的 DOLP^e 和 DOLP^r , 结果如图 2~图 4 所示。

4.1 偏振辐射模型分析

图 2 为通过 pBRDF 模型和镜面反射模型^[6] 计算出来的海面自发辐射 DOLP^e 随波长 λ (3.0~4.8 μm) 的变化曲线。其中, 风速为 10 m/s, 微小面元上的斜率方差 $\sigma^2 = 0.052$, 观测天顶角分别为 $10^\circ, 45^\circ, 70^\circ$ 。虚线为文献[6]中的不同观测天顶角下的自发辐射 DOLP^e 随波长变化的曲线, 实线为本文通过 pBRDF 模型计算得到的不同观测天顶角下自发辐射 DOLP^e 随波长变化的曲线。

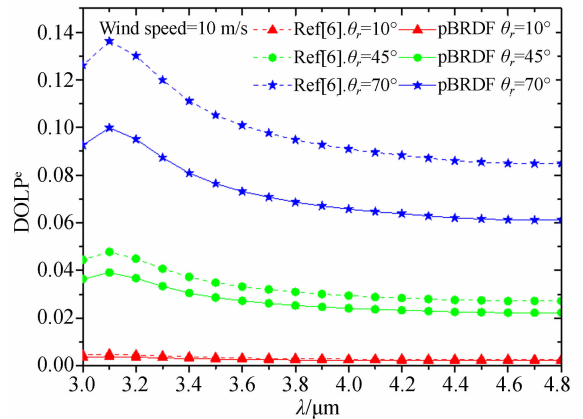


图 2 不同观测天顶角下 DOLP^e 随波长变化的关系
Fig. 2 DOLP^e versus wavelength with different observation zenith angles

由图 2 可知, 相同观测天顶角下镜面反射和 pBRDF 模型计算得出的 DOLP^e 具有相同的变化趋势, 但是数值上略有差异, 并且观测天顶角越大, 差异越大。产生这种现象的原因是: 由于镜面反射模型仅在垂直和水平方向产生偏振, 而在 pBRDF 模型中 Mueller 矩阵的作用下, 海面的自发辐射在垂直和水平方向以及 45° 和 135° 方向同时具有偏振分量。在光谱段 3.0~4.8 μm , 海面自发辐射在垂直和水平方向线偏振光强的差异高于 45° 和 135° 方向线偏振光强的差异, 从而导致基于 pBRDF 模型得到的海面自发辐射 DOLP^e 在数值上低于镜面反射模型。

图 3 为风速分别为 3, 5, 10 m/s 下自发辐射

DOLP^e 随观测天顶角变化的关系,仿真波长为 4 μm ,微小面元上的斜率方差 σ^2 分别为 0.021, 0.028 8, 0.052。由图 3 可知,通过 pBRDF 模型仿真得到的 DOLP^e 与文献[6]中结果较为接近,两者的 DOLP^e 都随着观测角的增大而增大。在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,自发辐射的 DOLP^e 较低,与风速的相关性较低;当观测天顶角大于 30° 时, DOLP^e 随着风速的增大而减小。并且在数值上,通过镜面反射模型得到的 DOLP^e 高于由 pBRDF 模型得到的 DOLP^e。这是由于风速增大时,海面粗糙度增大,对自发辐射的起偏效果减弱,海面为镜面时,偏振效果最明显。

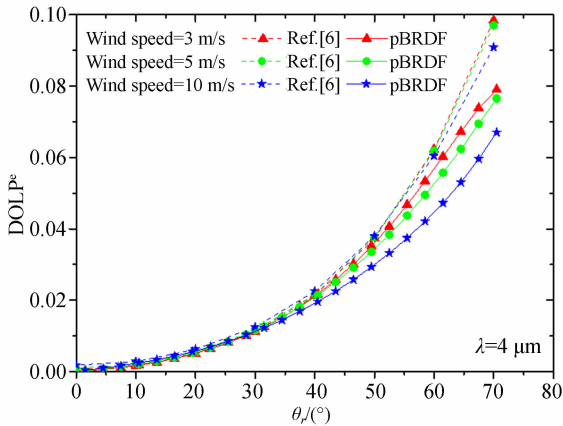


图 3 不同风速下 DOLP^e 随观测天顶角变化的曲线
Fig. 3 DOLP^e versus observation zenith angle with different wind speeds

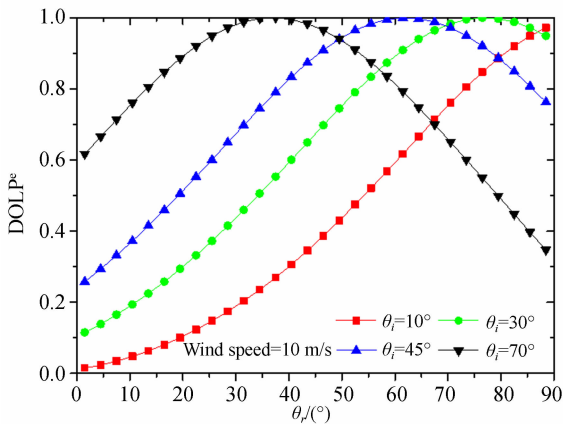


图 4 不同入射天顶角下 DOLP^r 随观测天顶角变化的曲线
Fig. 4 DOLP^r versus observation zenith angle with different incident zenith angles

图 4 是入射天顶角分别为 $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 70^\circ$ 时,通过 pBRDF 模型计算得到的 DOLP^r 随观测天顶角变化的曲线。观测方向在入射平面内(即 $|\varphi_r - \varphi_i| = 180^\circ$),风速为 10 m/s,微小面元上的斜率方差 $\sigma^2 = 0.052$ 。

如图 4 所示,当入射天顶角分别为 $30^\circ, 45^\circ, 70^\circ$ 时, DOLP^r 峰值分别出现在观测天顶角为 $76.5^\circ, 61.5^\circ, 37.5^\circ$ 处,此时反射光达到了完全偏振;而入射天顶角为 10° 时, DOLP^r 峰值处的观测天顶角接近 90° ,但是在峰值处达不到百分百偏振。光在无风海面上的反射可以看作是镜面反射,只有当入射天顶角为海水的布儒斯特角(约为 53.5°)时,反射光在 $\theta_r = 53.5^\circ$ 处达到完全偏振。然而当风速为 10 m/s 时,由于风力的影响,海面可以看作是由倾斜的具有一定粗糙度的微粗糙面元组成的粗糙面,所以入射光在每个微面元上朝着不同方向散射。尽管每个微面元的倾斜角度不同,入射光在不同微面元上的入射天顶角不同,但整体上还是遵循入射天顶角和观测天顶角之和约等于两倍布儒斯特角。

4.2 红外海面偏振成像仿真结果

基于本文提出的红外偏振辐射模型,利用 Modtran 软件计算太阳的辐照度,对海上探测器接收的红外辐射进行仿真,并结合基于海浪谱生成的三维随机海面高度及斜率信息,模拟生成海面红外偏振图像,如图 5~图 7 所示。仿真参数如表 2 所示,仿真平台为 MATLAB,海面的粗

表 2 红外海面偏振成像仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters for infrared polarization imaging of sea surface

参数	设置
海面区域	128 m \times 128 m
微面元斜率方差	0.052
风速	10 m/s
风向	0°
海水温度	298.15 K
仿真波长	4 μm
太阳天顶角	30°
太阳方位角	0°
探测器位置	(200, 200, 500)
舰船折射率	6.77
舰船粗糙度	1.134
仿真平台	MATLAB

糙度根据风速以及式(4)计算得到。太阳以 30° 的天顶角以及 0° 的方位角入射,经过海面各个微小面元反射至位于 $(200, 200, 500)$ 处的探测器中,通过每个面元与探测器的相对位置关系即可计算出反射天顶角和方位角。此处,方位角为沿着 x 轴正方向逆时针方向旋转的角度。

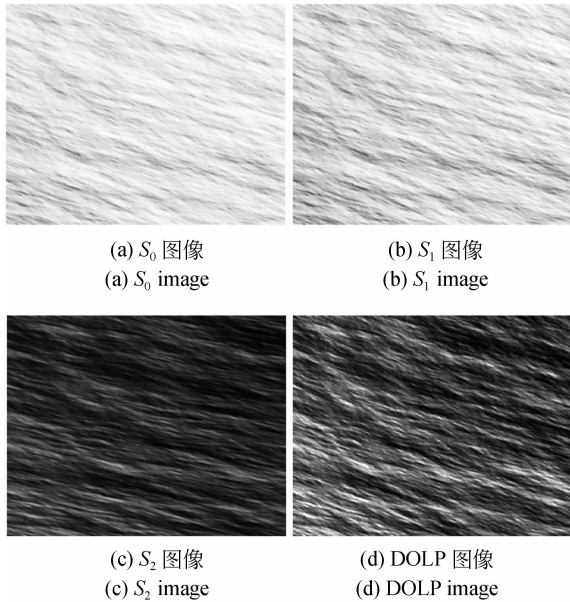


图 5 海面自发辐射偏振仿真图像
Fig. 5 Simulated polarimetric infrared images of sea surface without Sun

图 5 为海面自发辐射偏振仿真图像。由于海面自发辐射的圆偏振分量占比极少,所以 S_3 图像不予显示。从图中可以看出海面自发辐射的 S_0 图像较为平滑,由于 S_0 图像是非偏振的红外强度图像,整体对比度较低,由于海面高低起伏所造成的方向非偏振发射率差异而产生的光强分布变化不太明显。偏振分量 S_1 图像和 S_2 图像相对于 S_0 图像拥有更强的对比度,可以看到海面更多的细节,并且 S_1 图像比 S_2 图像的整体灰度更亮,说明在当前观测方向下,海面自发辐射的水平和垂直线偏振光强的差异高于 45° 和 135° 线偏振光强的差异。此外,DOLP 图像的对比度和细节最为明显,表明利用偏振探测获取海面自发辐射的偏振度图可以提高图像的质量,能够为识别海上目标提供依据。

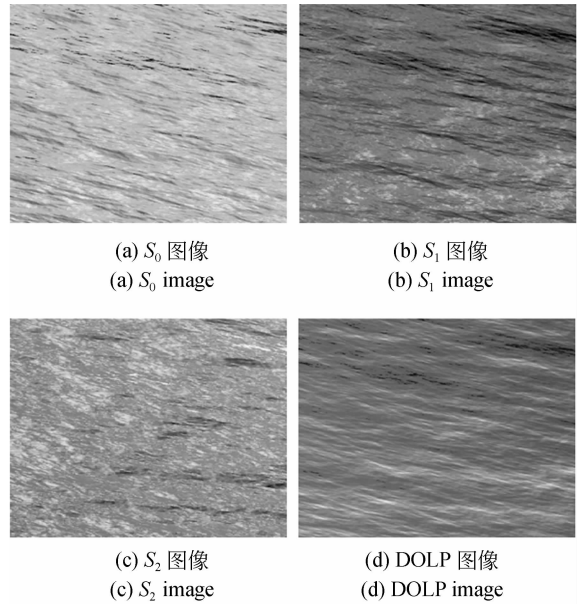


图 6 包含反射辐射和自发辐射的海面偏振仿真图像
Fig. 6 Simulated polarimetric infrared images of sea surface with Sun

图 6 为包含太阳反射和自发辐射的海面红外偏振仿真图像。图 6(a)中,太阳耀光现象比较明显。产生这种现象的原因是在当前太阳入射几何条件下,探测器从坐标为 $(200, 200, 500)$ 处朝向海面中心探测时,太阳光的入射方向和探测器的接收方向关于部分面片的法向量对称,形成镜面反射,此方向反射率较高,从而产生了太阳耀光。在进行海上目标检测时,太阳耀光会干扰海上目标的检测与识别。由于遮挡与阴影函数的影响,从某些面片上反射的偏振光会被附近的面元遮挡,探测器接收到此面元的光强贡献为 0,因此这些面元在图像上表现为黑色。偏振图像 S_1 和 S_2 在一定程度上增强了图像的对比度,但是仍然无法消除太阳耀光的影响。从图 6(d)中可以看出,DOLP 图像有效滤除了太阳耀光,使图像变得更加均匀。通过对图 6 中的 S_0, S_1, S_2 和 DOLP 图像进行方差、信息熵及对比度等图像质量评价的计算,如表 3 所示。偏振图像的上述 3 个评价指标均高于非偏振图像 S_0 ,其中 S_1 图像的 3 个指标最大,且对比度最高,图像所包含信息最为丰富,这是由于海面上 S_1 分量即垂直和水平方向线偏振光差异较大,偏振效应较为明显。

表 3 图像质量评价结果

Tab. 3 Results for image quality evaluation

图像	方差	信息熵	对比度
S_0 (强度)	515.864 6	6.232 5	22.712 6
S_1	690.056 1	6.702 5	26.268 8
S_2	625.357 8	6.669 2	25.007 1
DOLP(线偏振度)	535.596 1	6.531 9	23.142 9

为了更加直观地对比海面与人造目标的偏振特性差异,本文对海面以及舰船进行了红外偏振成像仿真。其中,海面使用 pBRDF 和偏振自发

辐射模型进行仿真,而舰船使用典型的 P-G 模型^[21]进行仿真,仿真结果如图 7 所示。 S_0 为非偏振图像,图像的灰度与红外辐射亮度成正比,从图中可以看出,舰船温度高于海面温度,细节信息较不明显。图 7(b)、7(c)和 7(d)为偏振图像,其灰度亮暗与温度无关,是偏振度的体现。灰度越高,偏振度越大,灰度越低则反之。从偏振图像中可以看出,与 S_0 相比,舰船和海面的对比度显著提升。并且,偏振图像下,舰船的纹理细节信息更加明显,不同几何朝向的面元在偏振度上具有明显的差异,说明本文提出的偏振模型可以用于仿真海场景,可为海上目标的检测、识别及跟踪等应用提供数据支持。

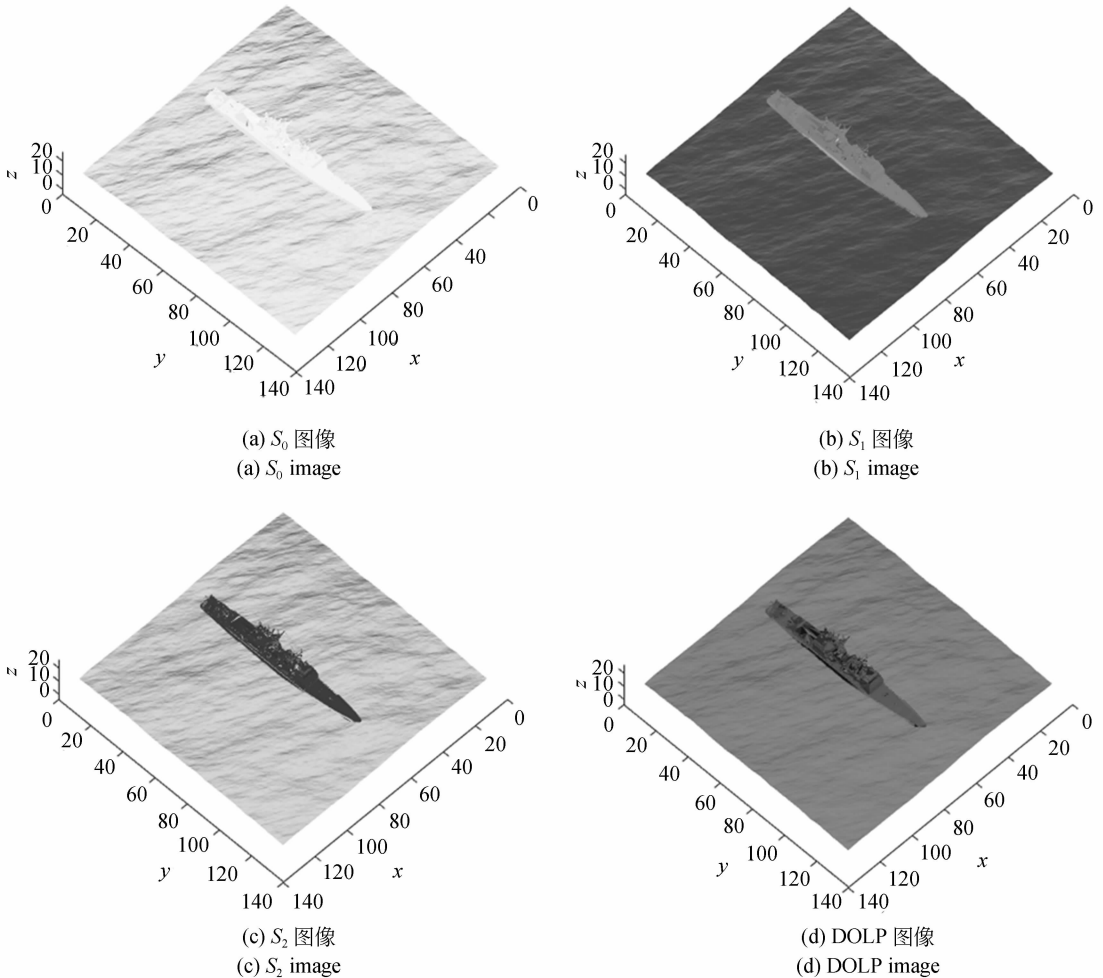


图 7 包含反射辐射和自发辐射的海面目标偏振仿真图像

Fig. 7 Simulated polarimetric infrared images of sea surface and target with Sun

5 结 论

本文综合考虑了海面的自发辐射与反射效应对探测器接收辐射的影响,通过建立 pBRDF 模型和偏振自发辐射模型,分别对海面反射辐射和自发辐射的线性偏振度 DOLP 进行了分析。结合海浪谱和快速傅里叶变换对二维海面进行了几何建模。在此基础上,将海面划分成若干个微面元,结合每个面元的位置信息和斜率信息,仿真了海面的自发辐射偏振图像和红外辐射偏振图像。与传统的光线跟踪方法不

同,本文将每个微面元均当作一个具有粗糙度的粗糙面,而不是近似地当作镜面,从而减少了面元数的划分,在不影响仿真精度的情况下有效提高了仿真效率。仿真结果表明:本文仿真模型与微面元镜面反射模型计算得出的 DOLP^e 相接近,但是本文的模型能计算出自发辐射在 45°和 135°方向的线偏振辐射,更加真实地反映海面自发辐射的实际情况。另外,本文对仿真生成的海面红外偏振图像进行了质量评价,并将海面与典型人造目标舰船的红外偏振图像进行了对比,证明了红外偏振成像在海上目标探测方面的有效性。

参考文献:

- [1] BJÖRKERT S, RENHORN I G E. Efficient polarimetric BRDF transformations [C]. *Proc SPIE 9820, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVII*, Baltimore, Maryland, USA, 2016, 9820: 98200D.
- [2] ZONIOS G, BASSUKAS I D, DIMOU A. Comparative evaluation of two simple diffuse reflectance models for biological tissue applications[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(27): 4965-4973.
- [3] HE X D, TORRANCE K E, SILLION F X, et al. A comprehensive physical model for light reflection [C]. 1991 *Proceeding, Special Interest Group on Graphics and Interactive*.
- [4] COOPER A W, CRITTENDEN E C Jr, MILNE E A, et al.. Mid- and far-infrared measurements of Sun glint from the sea surface [C]. *Proc SPIE 1749, Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement*, San Diego, CA, USA, 1992, 1749: 176-185.
- [5] GREGORIS D J, YU S K W, COOPER A W, et al.. Dual-band infrared polarization measurements of Sun glint from the sea surface [C]. *Proc SPIE 1687, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds II*, Orlando, FL, USA, 1992, 1687: 381-391.
- [6] SHAW J A, MARSTON C. Polarized infrared emissivity for a rough water surface [J]. *Optics Express*, 2000, 7(11): 375-380.
- [7] CHANG P, FLITTON J C, HOPCRAFT K I, et al.. Importance of shadowing and multiple reflections in emission polarization [J]. *Waves in Random Media*, 2002, 12(1): 1-19.
- [8] MEYERS J P. *Modeling Polarimetric Imaging Using DIRSIG* [D]. Michigan: Graduate University of the Michigan Technological, 2002.
- [9] LATGER J, CATHALA T, DOUCHIN N, et al.. Simulation of active and passive infrared images using the SE-WORKBENCH [C]. *Proc SPIE 6543, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII*, Orlando, Florida, USA, 2007, 6543: 654302.
- [10] 姜树理, 周晓东. 各向异性粗糙海面的红外反射特性研究 [J]. *光散射学报*, 2011, 23(3): 277-282.
LOU SH L, ZHOU X D. Research on infrared reflectance of anisotropic rough sea surface [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, 23(3): 277-282. (in Chinese)
- [11] 杨敏, 方勇华, 吴军, 等. 基于六参量偏振 BRDF 模型的地物背景偏振反射特性研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 273-280.
YANG M, FANG Y H, WU J, et al.. Polarized

- reflectance properties for ground-feature's background based on six-component PBRDF model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 273-280. (in Chinese)
- [12] 刘宏, 朱京平, 王凯. 基于随机表面微面元理论的二向反射分布函数几何衰减因子修正[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 330-335.
LIU H, ZHU J P, WANG K. Modification of geometrical attenuation factor of bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 330-335. (in Chinese)
- [13] 章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 441-447.
ZHANG Y J, WANG X, HE S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized Bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 441-447. (in Chinese)
- [14] 张颖, 宋平, 赵慧洁. 一种适用于涂层的双高斯偏振 BRDF 模型[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 200-206.
ZHANG Y, SONG P, ZHAO H J. Double-Gauss polarimetric BRDF model of painted surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 200-206. (in Chinese)
- [15] 韩平丽, 刘飞, 魏雅喆, 等. 用于海面目标探测的中波红外实时偏振成像系统研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6): 746-752, 760.
HAN P L, LIU F, WEI Y ZH, *et al.*. Real-time mid-infrared polarization imaging system design for marine targets detection[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 746-752, 760. (in Chinese)
- [16] HE M, HU Y X, HUANG J P, *et al.*. Aerosol optical depth under "clear" sky conditions derived from sea surface reflection of lidar signals [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): A1618-A1634.
- [17] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, *et al.*. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [18] HE S, WANG X, XIA R Q, *et al.*. Polarimetric infrared imaging simulation of a synthetic sea surface with Mie scattering [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): B150-B159.
- [19] 李军伟, 陈伟力, 徐文斌. 红外偏振成像技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI J W, CHEN W L, XU W B. *Infrared Polarization Imaging Technology and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [20] MOBLEY C D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4828-4849.
- [21] PRIEST R G, GERNER T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements [EB/OL]. *Proceeding, the Military Sensing Symposia Specially Group Passive Sensors*, 2000.
- [22] 陈璐. 海面红外辐射特性建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
CHEN L. *Infrared Radiation Characteristics Modeling and Simulation of Sea Surface* [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [23] 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 L X, WANG R, WU ZH S. *Basic Theory and Method of Electromagnetic Scattering From Random Rough Surface* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [24] DALIMONTE D, KAJIYAMA T. Effects of light polarization and waves slope statistics on the reflectance factor of the sea surface[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 7922-7942.
- [25] HYDE M W, SCHMIDT J D, HAVRILLA M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22138-22153.
- [26] TSANG L, KONG J A, SHIN R T. *Theory of microwave remote sensing* [EB/OL]. Wiley Interscience, 1985.
- [27] 张建奇. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学

出版社, 2013.

ZHANG J Q. *Infrared Physics*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)

[28] RESNICK A, PERSONS C, LINDQUIST G. Polarized emissivity and Kirchhoff's law[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1384-1387.

作者简介:



张 弛(1992—),女,四川射洪人,博士研究生,主要从事目标与环境光学散射特性的研究。Email: 467473107@qq.com

通讯作者:



吴 鑫(1986—),男,博士,硕士生导师,主要从事光电场景仿真以及微纳光学成像的研究。Email: xwu@xidian.edu.cn