

引用格式: TAN Chang, WANG Shiyong, GAO Sili, et al. Infrared Polarization Imaging Simulation of Sea Scenes Based on Improved Polarized Bidirectional Reflectivity Distribution Function[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0611001
谭畅,王世勇,高思莉,等. 基于改进偏振双向反射分布函数的海面场景红外偏振成像仿真[J]. 光子学报, 2022, 51(6):0611001

基于改进偏振双向反射分布函数的海面场景 红外偏振成像仿真

谭畅^{1,2,3}, 王世勇^{1,2}, 高思莉^{1,2}, 陈丽^{1,2,3}, 陈玮琳^{1,2,3}, 裘莉娅^{1,2,3}

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为解决传统偏振双向反射分布函数计算复杂、渲染实时性差的问题,基于微平面理论,提出一种更快速的偏振双向反射分布函数模型,并完成全链路的成像仿真。依据P-M海浪谱生成海面,设计了适用于偏振仿真的三维数据存储结构,讨论了探测器接收到的有效辐射并建立辐射控制方程,提出用宏观面元法向与探测方向中间向量代表微观面元平均取向的假设,改进传统P-G偏振双向反射分布函数模型。建立了海面与舰船的定向半球偏振反射率与发射率模型,最后对探测器进行建模,生成海面与舰船的图像,计算出偏振度图像,并与相近条件下获取的实拍图像进行了对比。结果表明,基于该仿真模型得到的仿真图像,与相近条件下获取的实测图像有良好的匹配度,证明了模型的准确性。

关键词:红外偏振;偏振双向反射分布函数;成像仿真;偏振成像;海浪谱

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225106.0611001

0 引言

海面舰船是海上搜救和海岸线监测的重点关注对象,目前海面监测主要采用红外探测^[1],但当海面目标温度与海水温度相近时,基于辐射强度的传统红外探测存在较大的局限性。同时,海面这一特定探测场景对太阳和天空光的强烈反射所产生的太阳耀光进入成像系统,也可能导致目标丢失。红外偏振探测作为一种新型探测技术,可以获得偏振多维信息,在探测目标辐射强度的同时,还能够反映其偏振信息,对太阳耀光也有很好的抑制作用,有针对性地解决了海洋场景下传统红外目标探测的两大难题。针对不同场景对舰船目标进行红外偏振仿真,产生大量数据对红外偏振目标探测与识别系统进行训练,不但有助于提升性能,且大大降低了训练成本。

红外偏振仿真技术作为提升偏振探测技术的重要辅助手段,可为红外偏振探测器的设计提供理论依据与参考。国外对于红外偏振仿真技术的研究开始较早,已有比较成熟的具备偏振仿真能力的仿真平台,如美国罗切斯特理工学院数字成像和遥感实验室开发的仅向美国政府机构和合同商发布的DIRSIG,已具备偏振仿真的功能。GARTLEY M G^[2]介绍了DIRSIG的软件框架与仿真流程,MEYERS J等^[3]阐述了辐射传输矩阵的修正方法,使其具备偏振成像仿真的功能。BOGER J K^[4]建立了长波红外偏振探测器的全链路仿真模型,BJÖRKERT S等^[5]改进了传统偏振双向反射分布函数(polarized Bidirectional Reflectivity Distribution Function, pBRDF),使其更适用于场景仿真。

国内对目标的偏振特性研究起步较晚,目前还没有成熟的具备偏振仿真功能的商用仿真软件推出,马

基金项目:上海市现场物证重点实验室基金(No.2017xcwzk08),上海技术物理研究所创新基金(No.CX-267)

第一作者:谭畅(1994-),女,博士研究生,主要研究方向为红外偏振成像仿真。Email: 452483903@qq.com

导师(通讯作者):王世勇(1972-),男,研究员,博士,主要研究方向为红外光电系统技术、红外图像信号处理。Email: s_y_w@sina.com

收稿日期:2021-11-24;录用日期:2022-02-15

<http://www.photon.ac.cn>

帅等^[6]考虑了目标的自发辐射,建立了双参数的pBRDF数学模型;柳祎等^[7]基于微面元双向反射分布函数模型,构建出含有遮蔽函数的粗糙表面红外辐射偏振度的斯托克斯解析模型;汪杰君等^[8]综合考虑镜面散射和漫散射,构建了一种改进的偏振双向反射分布函数模型,并利用该模型对材料的复折射率进行了反演。

对于成像仿真来说,最精确的方法是光线追迹法,利用全局光照的思想,模拟出所有光线与表面的全部能量交互,但是对于偏振成像仿真来说,在原本海量计算的基础上,又多了偏振态的传输过程,MOBLEY C D^[9]曾在 2.5 GHz 的计算机上生成 105 个表面,追踪大约 36×106 条光线,所需时间超过 8 h,这一时间成本对于大部分工程来说都是灾难性的。本文结合 Pierson-Moscowitz(P-M)海浪谱与 Cox-Munk 模型建立了具有粗糙度的海面三维几何模型,设计了适用于红外偏振成像仿真的三维数据存储结构,改进传统 Priest Germer(P-G)双向反射分布函数,仿真模型实时性得到改善。

1 三维几何模型建立

1.1 基于海浪谱的海面三维模型建立

选择基于海浪谱的方式构建海面的三维模型,海浪谱反映海面海浪在传播方向和波长上波能的统计分布,即海面高度起伏相关函数的傅立叶变换,是海面的功率密度谱。可通过快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform,IFFT)将海浪谱模型转换为高度场,进而建立海面的几何模型^[10]。

选择以风速作为唯一参量的 PM 谱生成海面三维模型,其公式为

$$S_{PM}(k) = \frac{\delta}{2k^3} \exp\left(\frac{-0.74 \cdot g^2}{k^2 \cdot U_{19.5}^4}\right) \quad (1)$$

式中, k 为海浪波数, δ 为大尺度广义平衡参数,取 8.1×10^{-3} , $U_{19.5}$ 为海面上方 19.5 m 处的风速, g 为重力加速度。

已知 PM 海浪谱随方向变化的分布函数为

$$G_{PM}(\varphi) = \cos^4\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

则二维 PM 谱可表示为

$$\Psi_{PM}(k, \varphi) = S_{PM}(k) \cdot \cos^4\left(\frac{\varphi - \varphi_m}{2}\right) \quad (3)$$

式中, φ_m 为海浪传播方向, φ 为风向角。由此可利用二维 PM 海浪谱生成海面高度场,首先设定欲仿真的海面尺寸 L_x 、 L_y ,并确定空间快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)网格数目 M 和 N ,从而得到波数 $K=(k_x, k_y)$, $k_x=2\pi m/L_x$, $k_y=2\pi n/L_y$, m 和 n 的取值为区间 $[-M/2, M/2]$ 和 $[-N/2, N/2]$ 内的整数,再根据网格点的坐标 (x, y) 与波数计算得到对应的频率 ω 。计算出海面上每一点 $P_h(K)$ 值,并得到用于生成海浪高度场的振幅 $\tilde{h}_0(K)$,根据其共轭性,通过 IFFT 计算出海面某一点的瞬时波高 $h(x, y)$,即

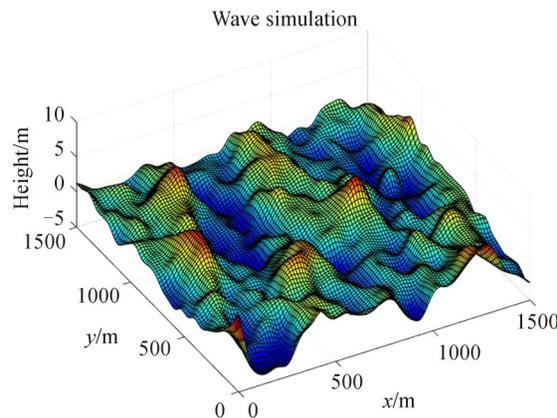


图1 由P-M海浪谱生成的海面三维模型

Fig.1 Sea surface 3D model generated from P-M wave spectrum

$$h(x, y) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m=-\frac{M}{2}+1}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \tilde{h}(k_x, k_y) \cdot \exp[j(k_x \cdot x + k_y \cdot y)] \quad (4)$$

由此可以根据不同风速绘制出海面不同时刻的瞬时波形,但对于偏振仿真来说,还需要获得微面元尺度的海面斜率方差(σ^2),即海面粗糙度,可用 Cox-Munk 模型来计算,即

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.00512 W_{12.5} \pm 0.004 \quad (5)$$

式中, $W_{12.5}$ 为海面上方 12.5 m 处的风速。

由此获得了用于红外偏振仿真的全部海面参数,创建如图 1 所示的海面三维模型。

1.2 舰船三维模型构建

选择 3D MAX 作为构建目标三维几何模型的建模工具,舰船 3D 模型如图 2 所示,用三角面元作为基础面元构建模型表面,选择便于编辑的 ASE(ASCII Scene Export)文件格式将模型数据导出^[11],ASE 文件中的面元和顶点数据以最初建立模型时的子模块为单位进行存储,为保证模型的精确性一般会建立较多的子模块,导致仿真时访问顶面和面元数据变得复杂,文件中材质数据一般针对可见光成像,对于红外偏振仿真来说,不需要模型的光照与颜色数据,但对于不同的材质模块,需要添加其复折射率与粗糙度等材质属性,因此,将原始 ASE 文件中顶点和面元按照面元所处舰船部位和材质的不同重新划分模块,并对每个模块中顶点和面元重新组合编号,ASE 文件的具体数据结构如表 1 所示。

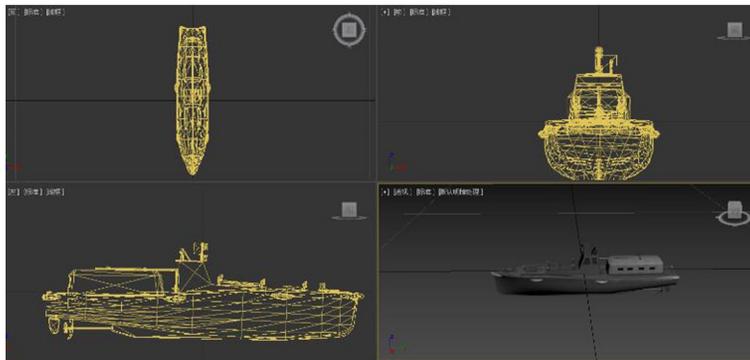


图 2 舰船三维几何模型

Fig.2 Three dimensional geometric model of ship

表 1 模型文件数据结构

Table 1 Data structure of model file

Name	Content
Target properties	Target number
	Type of target: for example: 01: sea surface; 02: ship
	Number of sub modules: for example, the ship can be divided into deck, upper building and hull side
	Number of bin
	Number of vertices
Attributes of the target sub module	Number of material properties
	Sub module number, such as: 01: deck; 02: hull side;
	The starting index value of the sub module vertex in the total vertex
	Number of sub module vertices
	Starting index value of sub module bin in total bin
Vertex list	Bin number of sub modules
	Sub module material attribute number
	All vertices in the target
Bin list	Vertex index in each bin
Attribute information	Including complex refractive index and roughness

2 红外偏振辐射模型

2.1 辐射能量模型建立

到达探测器孔径的总有效辐射可用辐射控制方程表示^[12],根据实际仿真需求得到简化后的公式为

$$L_{\text{EAR}} = E_{\text{D}} \cdot \tau \cdot \frac{\rho_{\text{d}}}{\pi} + \epsilon \cdot L_{\text{BB}} + F \cdot E_{\text{ref}} \cdot \frac{\rho_{\text{ref}}}{\pi} \quad (6)$$

式中, E_{D} 为太阳直接辐照度, τ 为大气透过率, ϵ 为目标发射率, L_{BB} 为目标自发辐射, F 是取值为 0 到 1 的缩放因子, E_{ref} 为太阳散射辐射辐照度, ρ_{d} 与 ρ_{ref} 为表面对太阳直接辐射与散射辐射的反射率。该控制方程列出了从目标、背景和大气路径向传感器反射或发射的有效辐射, 辐射传输过程如图 3 所示, 通过描述其辐射量与偏振态的传输过程, 最后得到目标红外偏振成像仿真的理论模型。

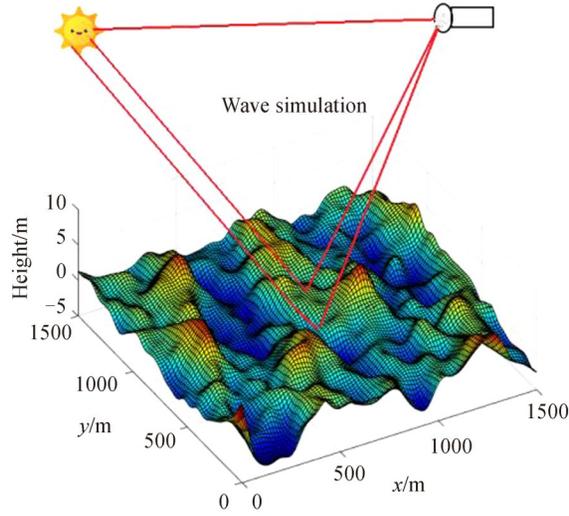


图 3 辐射传输示意图

Fig.3 Schematic diagram of radiation transmission

舰船与海面接收到的外部辐射主要是太阳的直接辐射与散射辐射^[13], 可将这部分入射辐射视作非偏振光, 经过介质表面的反射, 才会产生偏振效应。太阳直接辐照度计算公式为

$$E_{\text{D}} = E_0 \rho_{\text{t}}^{\alpha} \cos(\theta_{\text{T}}) \quad (7)$$

式中, E_0 为太阳常数, 取 1353 W/m^2 , ρ_{t} 为大气透明度, α 为大气质量, θ_{T} 为太阳光入射角。

太阳散射辐射辐照度计算公式为

$$E_{\text{ref}} = C_1 (\sin \theta_{\text{h}})^{C_2} \times \frac{4.186 \times 10^4}{60} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (8)$$

式中, C_1 和 C_2 是取决于大气透明度的经验系数, β 为斜面倾角, θ_{h} 为太阳高度角。

自发辐射的能量部分由普朗克定律求出, 辐射的空间分布率与偏振状态将在 2.2 节中讨论。

$$L_{\text{BB}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad (9)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为探测波长, k 为玻尔兹曼常数, T 为目标的表面温度。

2.2 偏振传输模型建立

在偏振光的传输中发生的透射反射等过程, 都可以表述为穆勒矩阵与光波 Stokes 矢量的作用, 假设入射光 Stokes 矢量为 \mathbf{S}_{in} , 出射光的 Stokes 矢量为 \mathbf{S}_{out} , 则有

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \times \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

用 pBRDF 模型表征反射过程中的能量传输过程, 分析几种常见的 pBRDF 模型, 他们有相同的一般形

式,即偏振的镜面反射分量 f_{pBRDF} 与非偏振的漫反射分量 f_{vol} ,而镜面反射部分也都是由菲涅尔反射穆勒矩阵 M 、材质表面的统计分布 $P(\theta_N)$ 和阴影与遮挡函数 $\text{SO}(\theta, \beta, \tau, \Omega)$ 三部分组成,非偏振部分则由体散射项 ρ_d 与漫反射项 ρ_v 组成,其具体表达式为

$$f_{\text{pBRDF}} = \frac{M(\beta, n, k)\text{SO}(\theta, \beta, \tau, \Omega)P(\theta_N, \sigma, B)}{4\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)} + f_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_r) \quad (11)$$

$$f_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_r) = \rho_d + \frac{2\rho_v}{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)} \quad (12)$$

式中, θ_i, θ_r 分别为入射方向和出射方向与宏观表面法线方向的夹角。

PG模型的一大优势是参数简单,除入射角与出射角外输入参数只需要材料的复折射率与粗糙度(即材质表面斜率方差 σ^2)。对于菲涅尔反射过程,主要工作是Mueller矩阵各参数的计算,不考虑圆偏振光的情况下, S_3 分量为0,只需求解Mueller矩阵的9个分量即可,其具体计算公式在文献[14]中有详细讨论。统计分布函数和阴影遮挡函数的数学公式为

$$P(\theta, B, \sigma) = \frac{Be^{-\frac{\tan^2\theta}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2\cos^3\theta} \quad (13)$$

$$\text{SO}(\theta, \beta, \tau, \Omega) = \frac{1 + \frac{\theta}{\Omega}e^{-2\beta/\tau}}{1 + \frac{\theta}{\Omega}} \quad (14)$$

式中, B 为偏置参数, σ 为粗糙度参数, τ 和 Ω 为描述阴影与遮蔽效果的参数。

为使模型更适应于计算机成像仿真,结合计算机图形学实时渲染中应用最广泛的Cook-Torrance BRDF模型,对PG模型的统计分布函数和阴影遮挡函数做出改进。

模型的每一个三角面元都看作由许多不可再逐像素分析的微平面组成,而粗糙度则是反应微平面法线取向的参数,即平面越粗糙,微平面法向排列越混乱,统计分布函数计算的是某一方向向量与面元平均取向方向一致的概率。而阴影遮挡函数则是为了计算微平面之间相互遮蔽的概率。可以将入射方向与观测方向间的中间向量近似看作这些微面元的平均取向,则式(13)、(14)可简化为

$$P(n, h, \sigma) = \frac{\sigma^2}{\pi((n \cdot h)^2(\sigma^2 - 1) + 1)^2} \quad (15)$$

$$\text{SO}(n, v) = \frac{n \cdot v}{(n \cdot v)\left(1 - \frac{\sigma^2}{2}\right) + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (16)$$

式中, h 为微平面平均取向的中间向量,由入射方向向量与观测方向向量求得, n 为面元的法线向量, v 为探测方向,各向量示意如图4所示。函数的输入参数仍仅为入射方向、出射方向与材质粗糙度,避免了复杂的指数运算,实验表明每一面元对其阴影遮挡函数与统计分布函数改进后,可减少2 ms的运行时间,对于采用

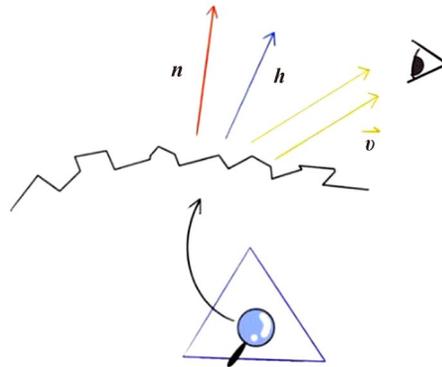


图4 中间向量示意图

Fig.4 Intermediate vector diagram

的舰船模型,共1974个三角面元,每一场景可减少耗时4s,对于更大规模的场景,模型将会展现出更大的优越性。

被测平面的方向半球反射率 ρ_{DHR} 可表示为

$$\rho_{\text{DHR}}(\theta_i) = \int f_{\text{pBRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \quad (17)$$

式中, $d\Omega_r = \sin\theta_r d\theta_r d\varphi_r$,由此完成了用菲涅尔反射Muller矩阵及微面元理论改进的PG模型来表示入射辐射到反射辐射的传输关系。

在建立偏振发射率模型时,假设材料在光谱的红外区域透射率为0,得到该面元的反射率后,根据基尔霍夫定律,可由半球反射率来求解发射率^[15],即

$$\rho + \tau + \epsilon = 1 \quad (18)$$

$$\epsilon(\theta) = 1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_{\text{pBRDF}}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \cdot \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) d\theta_r d\phi_r \quad (19)$$

简化后,对应探测角 θ ,入射到探测器的总红外偏振辐射为

$$L_a = \epsilon_p L_{\text{BB}}(T) + \rho_{\text{DHR}}(E_{\text{D}} + E_{\text{ref}}) \quad (20)$$

2.3 灰度映射

得到各分量的辐亮度后,计算出探测器接收到的辐照度为

$$E_{\text{sum}} = L_{\text{sum}} \times \frac{R^2 \cdot A_d}{f^2} \quad (21)$$

式中, L_{sum} 为面元总的红外辐射亮度, R 为探测器与面元之间的距离, A_d 为探测器光敏元的有效面积, f 为光学系统的焦距。可得到输出的电压信号为

$$V_s = R_v \cdot \frac{E_{\text{sum}} \cdot \tau_a \cdot \rho_s \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{4R^2} \quad (22)$$

式中, D 为光学系统的口径, ρ_s 为探测器的光学透过率, R_v 为探测器的响应率, τ_a 为由MODTRAN计算得到的大气透过率。

经过光电转换后的响应电压最后转换为相应灰度等级中的灰度值,即

$$G = V_s / V_{\text{lb}} \quad (23)$$

$$V_{\text{lb}} = (V_{\text{H}} - V_{\text{L}}) / 2^B \quad (24)$$

式中, B 为模数转换对应的灰度量级, V_{lb} 为电压的量化精度, V_{H} 为电路设置的输出上限电压, V_{L} 为电路中输出下限电压。

3 仿真结果

依据文献[2]的实测数据,对舰船与海面的表面材质赋值,见表2。表中 σ 为材质粗糙度, B 为偏置参数, n 和 k 代表了材质的复折射率, ρ_d 与 ρ_v 为非偏振的体散射项与漫散射项。

表2 舰船与海面材质属性
Table 2 Material properties of ship and sea surface

Material	σ	B	n	k	ρ_d	ρ_v
Sea	0.01	1.15	1.5	0.0	6.0×10^{-20}	2.0×10^{-8}
Ship	0.02	1.15	1.8	0.8	1.0×10^{-8}	3.0×10^{-8}

依据建立的理论模型,对于不同的探测角度,分别对舰船与海面的发射率与反射率的3个分量进行计算,得到结果见表3~4。由于舰船与海面偏振方向半球反射率的 S_2 分量都接近于0,在此不做计算。

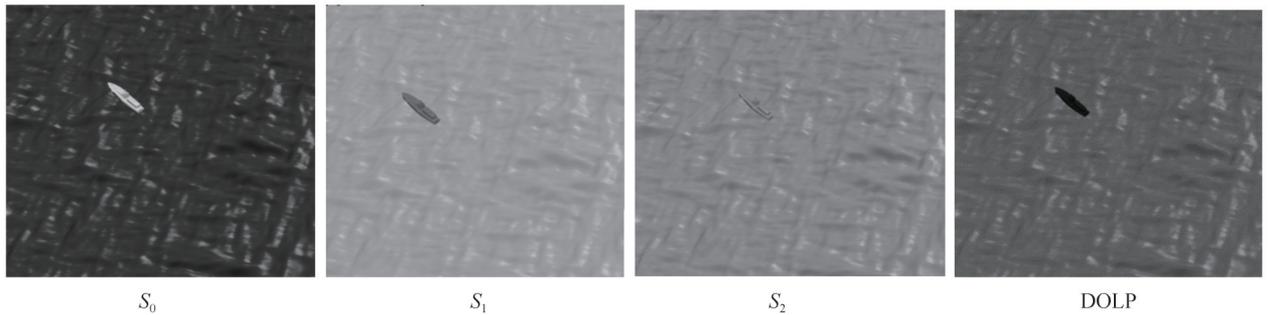
图5展示了基于改进仿真模型生成的仿真图像,与相近条件下采集的真实图像,具体仿真参数见表5。其中方位角与探测方向角均为与当地正北方向的夹角。

表3 海面定向半球偏振自发辐射率和偏振反射率
Table 3 Hemispherical spatially polarized spontaneous emissivity and reflectance of sea surface

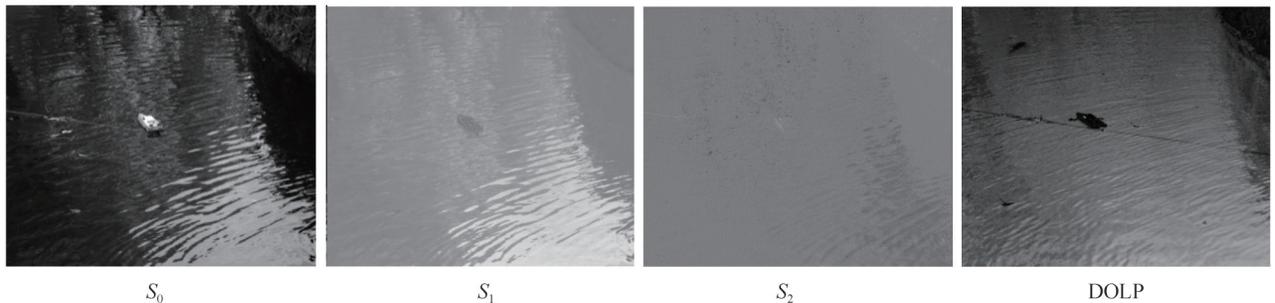
Detection angle/(°)	Spontaneous emissivity			Reflectance	
	S_0	S_1	S_2	S_0	S_1
0	1.100	0.025	0.020	0.091 6	0.008 7
10	0.942	-0.010	0.010	0.092 0	0.002 1
20	0.924	-0.011	0.010	0.093 5	0.008 7
30	0.906	-0.029	-0.010	0.097 2	0.019 7
40	0.857	-0.047	-0.020	0.105 2	0.034 9
50	0.912	-0.075	0.030	0.120 5	0.053 7
60	0.852	-0.100	0.010	0.148 7	0.075 2
70	0.740	-0.140	-0.020	0.201 2	0.099 7

表4 舰船定向半球偏振自发辐射率和偏振反射率
Table 4 Hemispherical spatially polarized spontaneous emissivity and reflectance of ship

Detection angle/(°)	Spontaneous emissivity			Reflectance	
	S_0	S_1	S_2	S_0	S_1
0	0.980	0.030	-0.013	0.070 1	0.000 4
10	0.953	-0.019	-0.012	0.070 1	0.002 7
20	0.941	-0.021	-0.008	0.070 6	0.011 4
30	0.955	-0.038	0.012	0.072 9	0.026 9
40	0.963	-0.057	0.021	0.080 2	0.050 9
50	0.942	-0.093	0.019	0.099 6	0.085 4
60	0.910	-0.138	0.012	0.147 2	0.130 9
70	0.799	-0.212	-0.030	0.258 1	0.180 8



(a) Simulated images



(b) Measured images

图5 舰船与海面的仿真图像与实测图像
Fig.5 Simulated and measured images of ship and sea surface

表5 仿真参数设置
Table 5 Simulation parameter setting

Parameter	Assignment
wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5
Sea surface roughness	0.032 6
Ship surface roughness	0.02
Detection wavelength/ μm	0.9~1.7
Seawater complex refractive index	1.06+i0.002
Ship complex refractive index	1.6+i12.699
Seawater temperature/K	290
Ship temperature/K	310
Solar elevation and azimuth/($^{\circ}$)	30,250
Detection direction angle/($^{\circ}$)	180
Detection angle/($^{\circ}$)	60
Detector focal length/mm	50
CCD size/cm	1.69

对比图6仿真与实测偏振度图像的灰度分布,可以看出二者有较强的相似度,但由于实拍图像中还有落叶、围墙、钢管等因素存在,部分区域存在一定的差异。同时可以看出,对于反射主导的短波红外探测来说,舰船与海面的 S_2 分量都趋近于0,与提出的理论模型相符,在实测图像与仿真图像上也有所体现。

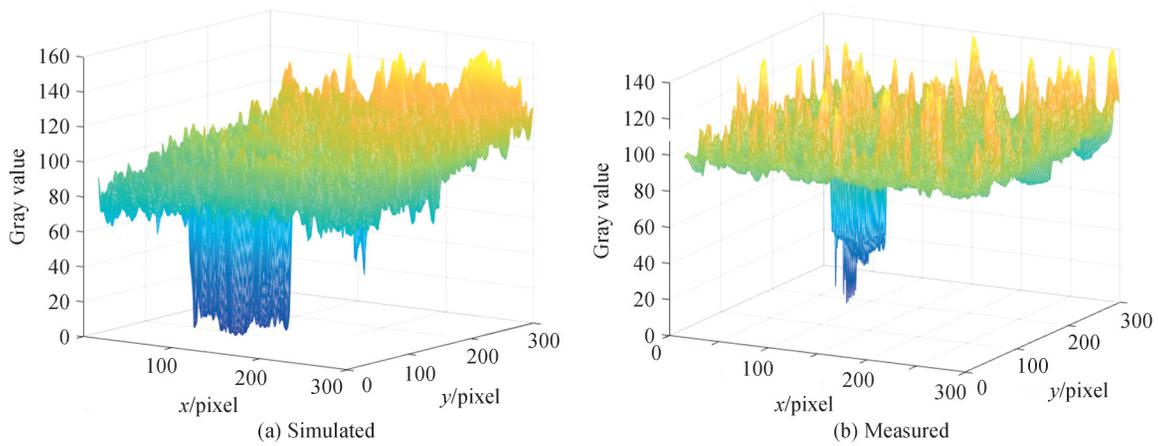


图6 仿真与实测偏振度图像的灰度分布

Fig.6 Gray distribution of simulated and measured polarization images

同时,为证明提出模型在仿真实时性方面的优势,对不同风速下不同面元数的海面与舰船目标分别采用传统PG模型与本文提出的改进模型,在6核心2.6 GHz,GTX 1660Ti的计算机上进行成像仿真,耗时结果如表6。

表6 仿真节约耗时对比
Table 6 Comparison of simulation time saving

Model	Roughness	Number of surfaces	Saving time/ms
Sea a	0.032 6	960	1 496
Sea b	0.032 6	1 974	3 968
Sea c	0.032 6	9 832	18 056
Ship a	0.02	574	988
Ship b	0.02	1 156	2 164
Ship c	0.02	2 038	3 906

因为提出模型的改进主要针对每一面元的阴影遮挡函数与统计分布函数,因此与目标自身的材质属性如粗糙度关系不大,主要取决于目标的面元数,从结果也可以看出,模型越复杂,面元数越多,改进模型相较于传统模型仿真节约的时间越多,优势越明显。

4 结论

本文根据海浪谱生成了海面的三维几何模型,针对红外偏振仿真的所需参数,设计了合理的数据存储结构。对辐射控制方程进行了简化,提出一种更适用于计算机实时渲染的偏振双向反射分布函数模型,平衡了仿真的真实性与实时性要求,同时建立了舰船与海面的半球空间发射率模型,综合考虑了海面与舰船的反射效应与自发辐射,基于探测器的焦距、孔径、响应率等参数建立了初步的探测器模型。采集了相似条件下真实水面上的舰船图像与仿真图像进行对比,二者偏振度图像的灰度分布较为相似。分别对海面目标成像仿真的耗时结果表明,该仿真模型相较于传统模型,在保证模型正确性的前提下,提升了成像仿真的速度。

参考文献

- [1] CHAI Hua. Research on infrared simulation for the sea ship wake[D]. Xi'an: Xidian University, 2017
柴华. 海面舰船尾迹实时动态红外仿真研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.
- [2] GARTLEY M. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared[J]. New York: Rochester Institute of Technology, 2007.
- [3] MEYERS J, SCHOTT J, BROWN S. Incorporation of polarization into the DIRSIG synthetic image generation model[J]. The International Society for Optical Engineering, 2002, 8(3): 132-143.
- [4] BOGER J K, TYO J S, RATLIFF B M, et al. Modeling precision and accuracy of a LWIR microgrid array imaging polarimeter[C]. SPIE, 2005, 5888: 227-238.
- [5] BJOERKERT S, RENHORN I. Efficient polarimetric BRDF transformations[C]. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVII, International Society for Optics and Photonics, 2016, 9820: 98200D.
- [6] MA Shuai, BAI Tingzhu, CAO Fengmei, et al. Infrared polarization simulation based on bidirectional reflection distribution function model [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3357-3361.
马帅, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3357-3361.
- [7] LIU Yi, SHI Haodong, JIANG Huilin, et al. Study on infrared polarization characteristics of rough target surface[J]. China Optics, 2020, 13(3): 459-471.
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.
- [8] WANG Jiejun, WANG Peng, WANG Fangyuan, et al. Modification of polarization bidirectional reflection distribution function model on material surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0126001.
汪杰君, 王鹏, 王方原, 等. 材料表面偏振双向反射分布函数模型修正[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0126001.
- [9] CURTIS D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4828-4849.
- [10] ZHANG Chi, WU Xin, XIE Jian. Characterization model of infrared polarization characteristics of sea surface based on bidirectional reflection distribution function [J]. Optical Precision Engineering, 2020, 28(6): 1303-1313.
张弛, 吴鑫, 谢建. 基于双向反射分布函数的海面红外偏振特性表征模型[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1303-1313.
- [11] WANG Xiao. Research on infrared radiation characteristics analysis and imaging simulation technology of air targets[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020
王霄. 空中目标红外辐射特性分析与成像仿真技术研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2020.
- [12] HARMEL T, CHAMI M. Determination of sea surface wind speed using the polarimetric and multidirectional properties of satellite measurements in visible bands[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(19): 198-227.
- [13] REN Haixia, REN Haigang, XU Gao. Real time infrared thermal image simulation platform for sea ships [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 202-206
任海霞, 任海刚, 徐杲. 实时海面舰船红外热像仿真平台[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 202-206.
- [14] LI Junwei. Infrared polarization imaging technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2017.
李军伟. 红外偏振成像技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [15] ZHANG Jinghua, ZHANG Yan, SHI Zhiguang. Analysis and modeling of polarization characteristics of sea scene based on long wave infrared[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2018, 37(5): 586-594.
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.

Infrared Polarization Imaging Simulation of Sea Scenes Based on Improved Polarized Bidirectional Reflectivity Distribution Function

TAN Chang^{1,2,3}, WANG Shiyong^{1,2}, GAO Sili^{1,2}, CHEN Li^{1,2,3}, CHEN Weilin^{1,2,3}, QIU Liya^{1,2,3}

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(2 Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important auxiliary means to improve polarization detection technology, infrared polarization simulation technology can provide a theoretical basis and reference for the design of infrared polarization detectors. For imaging simulation, the most accurate method is to use the ray tracing method and the idea of global illumination to simulate all the energy interaction between all rays and the surface. However, for polarization imaging simulation, based on the original massive calculation, there is more polarization state transmission process, which is disastrous for most projects. To solve the problems of complicated calculation of traditional polarization bidirectional reflection distribution function and poor real-time rendering, based on the microplane theory, a faster polarization bidirectional reflection distribution function model is proposed, and the imaging simulation of the whole link is completed. In this research, a semi-empirical model is used to simulate the shadowing and shading effects of radiant energy on rough surfaces using mathematical modeling. It avoids building a 3D model at the micro-facet scale, greatly reducing the workload of creating the sea surface and subsequent rendering. The sea surface is generated according to the P-M wave spectrum, and the Cox-Munk model is used to calculate the slope variance σ^2 of the sea surface, which is abstracted as the material properties of the sea surface, which reduces the complex calculation process and still conforms to the objective physical laws. A three-dimensional data storage structure suitable for polarization simulation is designed. For infrared polarization simulation, the illumination and color data of the model are not required, but for different material modules, material properties such as complex refractive index and roughness need to be added. Therefore, the vertices and surfels in the original ASE file are re-divided into modules according to the ship parts and materials where the surfels are located, and the vertices and surfels in each module are regrouped and numbered. The effective radiation received by the detector is discussed and the radiation control equation is established. For the specific scene of sea surface detection, the effective radiation that the detector is capable of receiving is analyzed, and a relatively complete radiation control equation is established. The created simulation model is more realistic. For infrared detection, the spontaneous radiation of the target and the sea surface is also a non-negligible part of the energy received by the detector. According to Kirchhoff's law, the spontaneous radiation polarization model of the sea surface and the ship target is established. It is assumed that the average orientation of micro-surface elements is represented by the intermediate vector between the macro-surface element normal and the detection direction, the traditional PG polarization bidirectional reflection distribution function model is improved, and a polarization bidirectional reflection distribution function model that is more suitable for computer real-time rendering is proposed, which balances the Authenticity and real-time requirements of simulation. The directional hemispherical polarization reflectivity and emissivity models of the sea surface and ships are established. Finally, the detector is modeled, and the radiance and polarization state of each surface element is calculated at the same time. The focal length, aperture, responsivity, and other parameters of the detector are used to establish a preliminary detector model, carry out reasonable grayscale mapping, generate S_0 , S_1 , and S_2 images, and calculate the polarization degree map to complete the simulation work of the whole link. The images of ships on the real water surface under similar conditions were collected and compared with the simulated images, and the gray-scale distributions of the polarization images were similar. The time-consuming results of imaging simulation of sea surface targets respectively show that compared with the traditional model, the simulation model improves the speed of imaging simulation under the premise of ensuring the correctness of the model. The simulation results provide theoretical support and data basis for target recognition of ships on the sea surface, wind speed inversion of sea surface remote sensing images, and feasibility demonstration before actual detection.

Key words: Infrared polarization; Polarized bidirectional reflectivity distribution function; Imaging simulation; Polarization imaging; Ocean wave spectrum

OCIS Codes: 110.5405; 260.5430; 110.3080

Foundation item: Shanghai Key Laboratory of Criminal Scene Evidence funded Foundation (No. 2017xcwzk08), Innovation Fund of Shanghai Institute of Technical Physics (No. CX-267)