

基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模

张景华, 张焱*, 石志广

(国防科技大学 电子科学学院 ATR 重点实验室 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对海面场景长波红外偏振特性建模问题,文中根据表面微元双向反射分布函数 *BRDF*,对物体表面偏振效应进行了分析,并结合红外发射效应和红外反射效应的综合作用,提出了一种长波红外偏振度计算模型.该模型有效描述了偏振度和物体自身红外发射值、红外反射值以及探测角之间的关系.利用 *RadthermIR* 软件对海水辐射、大气辐射与舰船目标辐射进行计算.结合本文构建的偏振度计算模型,仿真了不同时间段内、不同观测角度下海面背景和舰船目标在长波波段的偏振度变化规律.通过仿真数据与实际测量数据的对比分析,结果表明两者具有较好的拟合度,验证了该模型对于海面场景偏振度计算的有效性.

关键词: 红外偏振; 斯托克斯矢量; 偏振仿真; 发射和反射

中图分类号: TP391 文献标识码: A

Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band

ZHANG Jing-Hua, ZHANG Yan*, SHI Zhi-Guang

(Science and Technology on Automatic Target Recognition Laboratory,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the surface micro-element bidirectional reflectance distribution function (BRDF), the polarization effect of the object's surface is analysed. Based on infrared polarization characteristics in long wave band, a model combining the infrared reflected effect and emitted effect is developed to calculate the polarization degree. The simulation result of this model indicates that the degree of polarization is determined by the value of the ratio of emitted radiation to reflected radiation. With the use of RadThermIR, the emitted radiation and reflected radiation of the sea surface and ship targets can be obtained. Based on radiation results and the proposed polarization calculation model, the polarization degree of the ship and sea water surface in different time and different detected angle is simulated. Experiments were conducted to measure the polarization degree in sea scenarios. The experimental data are consistent with the simulated results, which validates the effectiveness of the proposed model.

Key words: infrared polarization, Stokes vector, polarization simulation, emitted radiation and reflected radiation

PACS: 42.72.Ai, 42.25.Ja

引言

红外探测技术是一种传统的目标探测识别技术,广泛应用于医疗、航天、军事目标检测等各个领域.传统的红外探测技术是利用目标与背景之间的

温差实现对目标的检测,当舰船目标与海面背景之间的温差较小时,基于辐射强度的红外探测手段表现出较大的局限性^[1].红外偏振探测技术作为一种新型的目标探测技术,能够提供更多与目标有关的信息,比如物体的材料种类、表面粗糙度等^[2-3].不同

收稿日期: 2018-01-05 修回日期: 2018-04-21

Received date: 2018-01-05 revised date: 2018-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302145) 武器装备预研基金(9140C800302KG01)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61302145), Pre-research Fund for Weapons and Equipment (9140C800302KG01)

作者简介(Biography): 张景华(1994-)男,河南商丘人,硕士研究生.主要研究领域为光学成像自动目标识别. E-mail: 965477460@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: atrthreefire@nudt.com.cn

的物体具有不同的偏振特征. 因此, 偏振成像技术可以弥补红外强度探测技术对于弱目标检测的不足, 具有十分广阔的应用前景.

一般情况下, 具有光滑表面的物体会表现出较强的偏振度^[4], 自然界中海水具有明显的偏振现象. 利用海水的偏振度特征, 能够为海洋气候分析、温室效应以及海面目标检测提供十分有价值的信息. 因此海面偏振特性研究一直都是国内外学者关注的热点. Sidran^[5]等探究了水体各光谱谱段的反射率和发射率, 分析了水面粗糙度对发射率和反射率以及偏振度的影响, 并讨论了水体偏振效应在遥感方面的应用. Shaw *et al.*^[6-7]等研究了基于水体红外发射的偏振度计算过程, 并计算了不同探测角度下海面偏振度的变化规律, 但是并没有定量分析红外反射效应和发射效应对海面偏振度的综合影响. Cooper *et al.*^[8-9]和 Walker *et al.*^[10]针对偏振技术在海面背景下舰船目标增强和检测的问题进行了研究. 他们对比分析了海水在中波红外和长波红外的偏振特性, 研究了太阳耀斑对海面偏振度的影响, 发现水平放置偏振片可以增强舰船目标与海面背景之间的对比度. 尽管关于海面偏振效应的研究工作已经开展多年, 但是, 目前还没有一种可以定量仿真计算海面偏振度的模型, 而传统基于单一红外发射效应或是红外反射效应的偏振度计算模型在计算海面偏振度时存在较大误差.

红外探测器接收到的能量主要来自物体自身的红外发射和对周围环境辐射的反射. 发射和反射的过程中都会产生偏振现象. 红外发射产生的偏振以平行发射面方向为主, 而红外反射产生的偏振以垂直反射面方向为主. 本文通过对红外发射和反射过程进行分析, 提出了一种结合两者综合效应的偏振度计算模型, 用于仿真不同时间段、不同探测角度下的海面偏振状态. 由于海水具有较强的长波红外辐射能力且表面十分光滑, 所以海面存在明显的偏振现象, 海面自身热辐射产生的偏振方向以平行反射面方向为主. 但是当观测角较大时, 海面反射率会增加, 海面反射的大气辐射和天空散射光辐射会导致海面偏振度降低. 本文基于海面场景的红外偏振特点, 通过对微面元反射模型及海面辐射场景进行合理简化, 并结合 RadthermIR 软件对海水辐射、大气辐射与舰船目标辐射进行计算, 提出了一种针对海面场景偏振度计算的模型. 通过对实验数据和计算数据进行对比分析, 结果表明该模型能够有效仿真出海水

和舰船的偏振状态, 为海面场景中偏振特征的提取和应用提供良好的数据基础.

1 水体表面红外光波反射和发射理论

1.1 基于 Stokes 矢量和双向反射分布函数的光波偏振状态分析

自然界中的红外偏振现象是由物体表面对光波的反射和自身红外发射产生的. 光波的矢量偏振状态可以用 Stokes 矢量 $E = [I \ Q \ U \ V]$ 表示. 其中参数 I 表示总光强, Q 表示水平光强和垂直光强之差; U 、 V 表示水平光波和垂直光波振幅与相位的调制关系. 在偏振成像探测中, 由于 V 分量成分很小, 一般认为 $V=0$. 根据 Stokes 矢量可求得光波的偏振度 P 和偏振角 A 分别为:

$$\begin{cases} P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ A = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (1)$$

在反射过程中, 光波偏振状态的传输过程可由双向反射分布函数 BRDF 表示^[11]:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i) \cos(\theta_r)} \quad (2)$$

其中 λ 表示光波波长, σ 表示反射面粗糙程度, θ 表示表面平均法线 z 与目标表面微元法线 q 的夹角; θ_i 、 φ_i 分别表示入射光波的入射角和方位角, θ_r 、 φ_r 分别表示反射光波的反射角和方位角, β 表示入射方向与目标表面微元法线 q 之间的夹角.

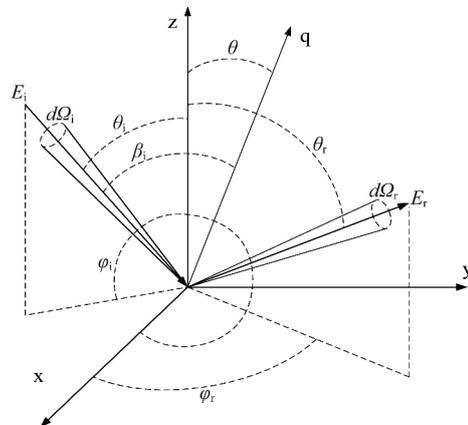


图 1 微面元反射模型示意图

Fig. 1 Reflection model of micro-surface

通过 Muller 矩阵, 能够将标量微面元 BRDF 模型推广到偏振矢量模型的计算过程中^[12]:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)} M(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (3)$$

当不考虑表面小面元间的相互遮挡时,由双向反射分布函数可求得半球反射率:

$$DF = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \sin\theta_r \cos\theta_r d\theta_r d\varphi_r \quad (4)$$

对于非偏振入射,入射光 E_i 的 Stokes 矢量表示形式为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,反射之后的光波矢量为:

$$E_r = DF \cdot E_i = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Muller 矩阵中的四个参数 $[m_{00} \ m_{10} \ m_{20} \ m_{30}]^T$ 可根据菲涅尔反射定律求得,由于反射过程中圆偏振成分十分微弱,参数 m_{30} 数值很小,通常将其忽略^[12-13].

$$\begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s(\lambda, \theta_i) + R_p(\lambda, \theta_i) \\ \cos(2\eta_i)(R_s(\lambda, \theta_i) - R_p(\lambda, \theta_i)) \\ \sin(2\eta_i)(R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$R_p(\lambda, \theta_i)$ 和 $R_s(\lambda, \theta_i)$ 分别表示光波平行入射面分量和垂直入射面分量的反射率^[14-16]:

$$R_p(\lambda, \theta_i) = \left| \frac{n_1(\lambda) \cos\theta_i - n_2(\lambda) \cos\theta_j}{n_1(\lambda) \cos\theta_i + n_2(\lambda) \cos\theta_j} \right|^2 \quad (7)$$

$$R_s(\lambda, \theta_i) = \left| \frac{n_2(\lambda) \cos\theta_i - n_1(\lambda) \cos\theta_j}{n_2(\lambda) \cos\theta_i + n_1(\lambda) \cos\theta_j} \right|^2 \quad (8)$$

其中 $n_1(\lambda)$ 为入射介质的折射率, $n_2(\lambda)$ 为透射介质的折射率, θ_i 为入射角, θ_j 为折射角.

η_i 是将标量 BRDF 偏振化时所引入的参考平面之间变换的旋转角^[13]:

$$\cos(\eta_i) = \frac{\cos(\theta) - \cos(\theta_i)\cos(\beta)}{\sin(\theta_i)\sin(\beta)} \quad (9)$$

根据以上公式,可求得反射波的偏振矢量:

$$E_r = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} (R_s(\lambda, \theta_i) + R_p(\lambda, \theta_i)) \sin\theta d\theta d\varphi_r \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_s(\lambda, \theta_i) - R_p(\lambda, \theta_i)) \sin\theta d\theta d\varphi_r \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \sin(2\eta_i) (R_s(\lambda, \theta_i) - R_p(\lambda, \theta_i)) \sin\theta d\theta d\varphi_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.2 光波反射矢量模型简化

式(10)是反射过程中偏振矢量传输数学模型的推导结果,该模型对于深入探究偏振特性以及偏振参数的定量计算有着重要意义.但是基于该模型的偏振度和偏振角计算过程较为复杂,为方便工程应用,我们对该模型进行简化.简化过程基于以下两种假设:

1. 反射面是光滑平面,表面粗糙度 σ 忽略不计;
2. 入射面和反射面在同一平面内,参考平面之间变换的旋转角 η_i 忽略不计;简化之后的反射波偏振度 P_R 为^[14-16]:

$$P_R = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \left| \frac{R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)}{R_p(\lambda, \theta_i) + R_s(\lambda, \theta_i)} \right| \quad (11)$$

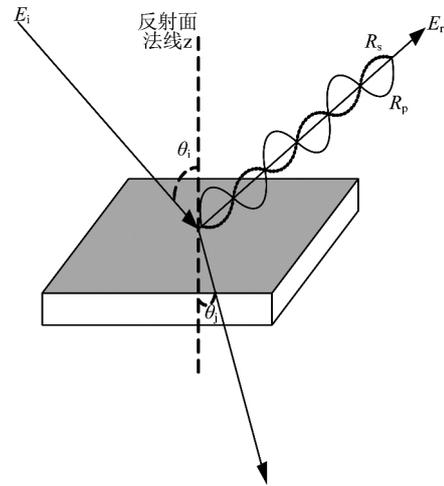


图2 反射模型简化示意图
Fig.2 Simplified model of reflection

任何温度高于绝对零度的物体都会向外进行自发辐射,物体在发射光波的过程中也会产生偏振效应.根据基尔霍夫定律和能量守恒定律,不考虑物体透射的能量时,反射率和发射率之和为 1^[17-18]:

$$\begin{cases} \varepsilon_p(\lambda, \theta_i) = 1 - R_p(\lambda, \theta_i) \\ \varepsilon_s(\lambda, \theta_i) = 1 - R_s(\lambda, \theta_i) \end{cases} \quad (12)$$

其中 ε_s 和 ε_p 分别表示垂直分量的发射率和平行分量的发射率.

发射过程中产生的偏振度 P_E 为^[18]:

$$P_E = \left| \frac{\varepsilon_s(\lambda, \theta_i) - \varepsilon_p(\lambda, \theta_i)}{\varepsilon_s(\lambda, \theta_i) + \varepsilon_p(\lambda, \theta_i)} \right| = \left| \frac{R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)}{2 - R_p(\lambda, \theta_i) - R_s(\lambda, \theta_i)} \right| \quad (13)$$

根据简化的矢量模型可知,当反射平面是光滑

平面且入射面和反射面在同一平面内时,由红外反射和发射产生的偏振现象,其偏振度可由光波矢量正交分解后的垂直方向分量和水平方向分量求解.

1.3 基于简化模型的光波反射和发射过程偏振度仿真

由式(11)和式(13)可知,偏振度大小和波长范围以及探测角度有关.一般而言,红外长波波段为8~12 μm,此波段的水体折射率实部在1.21左右,虚部在0.05i左右,如图3所示.因此对水体长波红外的偏振度进行分析时,通常设置水体折射率为固定值:1.21+0.05i,而只考虑探测角对偏振度的影响.利用上述公式分别对水体表面不同探测角时反射状态下的偏振度以及发射状态下的偏振度进行仿真,如图4所示.

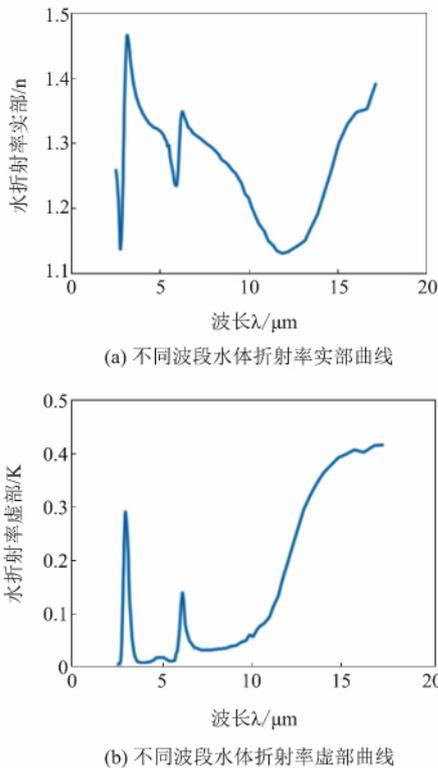


图3 不同波段水体折射率曲线
Fig.3 The reflectivity curves of water in different wavelength

图4(a)表明,在红外反射过程中,反射波的垂直分量始终大于平行分量,反射产生的偏振以垂直方向为主,反射偏振度随反射角的增大呈现先增加后减小的趋势.图4(b)表明,在红外发射过程中,发射波的平行分量始终大于垂直分量,发射产生的偏振以平行方向为主,发射偏振度随发射角的增大而单调增大.

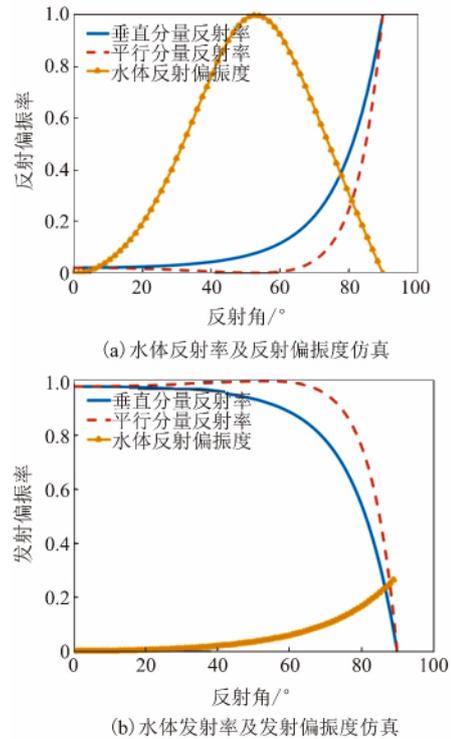


图4 水体反射偏振度和发射偏振度仿真
Fig.4 The simulation curves of the degree of polarization generated by reflection and emission of water surface

2 海面场景辐射分析及偏振特性建模

2.1 海面场景红外辐射分析

来自海面场景的红外辐射主要包括四部分:海水自身黑体光谱辐射 I_{sea-e} 、海水表面反射的太阳辐射 I_{sun} 、海水表面反射的大气辐射和天空散射光辐射 I_{air} 、观测目标区到传感器之间的路程辐射 I_{atp} .因此探测器接收到的辐射能量 I_{sea} 为:

$$I_{sea} = \tau_{\lambda} (\varepsilon \cdot I_{sea-e} + R \cdot (I_{sun} + I_{air})) + I_{atp} \quad (14)$$

其中 τ_{λ} 为大气的光谱透射率 R 表示海面反射率 ε 表示海面发射率.

在上述四部分辐射变量中,观测目标区到传感器之间的路程辐射 I_{atp} 对海面场景偏振效应的贡献最小,这是由于路径辐射中气体分子起偏方向是随机的,总体上并不表现出偏振现象,所以路径辐射对海面场景偏振效应的影响很小,可以忽略不计.而太阳辐射 I_{sun} 对海面偏振效应的影响主要表现在海面直接反射太阳辐射的区域,即耀斑区域.在非耀斑区域,太阳辐射对海面偏振度的影响很小.这是由于太阳辐射主要集中在可见光和短波区间,在长波区间,太阳辐射的能量较少,而且海面反射近似于镜面反射,只有在相对于太阳直射的方向才会表现出强烈

的反射效应. 因此,在非耀斑区域内,可以忽略太阳辐射的影响. 海面偏振度的主要影响因素是海水自身红外辐射 I_{sea-e} 和海面对大气辐射及天空散射光辐射 I_{air} 的反射. 根据菲涅尔反射定律可知,物体自身红外发射是红外偏振现象产生的重要原因. 而海面上空的大气环境辐射(主要包括大气分子自身热辐射、天空散射光的辐射)经海面反射之后,会对海面自身的偏振状态产生十分重要的影响,尤其是在观测角较大的时候,海面反射率较大,大气环境辐射对海面偏振效应的的影响更为明显.

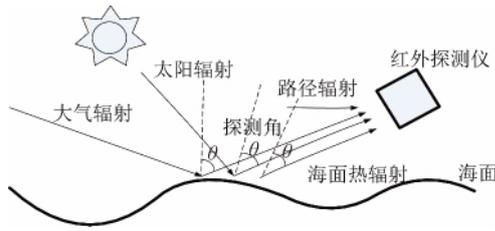


图5 海面辐射模拟图
Fig.5 Simulation of sea water infrared radiation

由于本文目前主要针对非耀斑区域内的目标展开研究,所以根据上述分析,在计算海面偏振状态时,对海面场景红外辐射模型进行了简化,忽略太阳辐射和路径辐射的影响,只考虑海水自身红外辐射和海面反射大气辐射及天空散射光辐射的影响.

2.2 基于红外发射和反射的偏振度计算模型构建

目前,海面场景的偏振度计算模型主要有两种:一种是如图4(a)所示的基于光波反射效应的偏振度计算模型,该模型利用海面的反射效应对偏振度进行计算,一般应用于可见光波段偏振度的计算;另一种是如图4(b)所示的基于发射效应的偏振度计算模型,由于海面热辐射以长波红外辐射为主,所以基于发射效应的偏振度计算模型被广泛应用于红外波段海面偏振度的计算过程中^[5-6,9-10].但是,由于海水表面在进行自身红外热辐射的同时还存在对周围环境辐射的反射效应,所以基于红外发射效应的偏振度计算模型在计算海面偏振度时会存在一定偏差.偏振度作为目标检测和识别的重要特征,在进行海面背景下舰船目标检测和识别时,良好的偏振度计算模型能提供与目标和背景相关的更精确的数据信息.为了准确描述物体表面在进行反射和发射过程中产生的偏振度,本文提出一种新的偏振度计算模型如下:

$$P = \frac{I_{SR} - I_{PR}}{I_{SR} + I_{PR}} \quad , \quad (15)$$

I_{SR} 是物体表面发射和反射垂直分量的总强度, I_{PR} 是物体发射和反射平行分量的总强度.

$$I_{SR} = R_s \cdot I_r + \varepsilon_s \cdot I_e \quad , \quad (16)$$

$$I_{PR} = R_p \cdot I_r + \varepsilon_p \cdot I_e \quad , \quad (17)$$

其中 R_s 和 R_p 分别表示垂直分量的反射率和平行分量的反射率, ε_s 和 ε_p 分别表示垂直分量的发射率和平行分量的发射率. I_r 表示物体表面反射的总能量, I_e 是物体自身发射的总能量.

定义目标发射能量与反射能量之比为 α :

$$\alpha = \frac{I_e}{I_r} \quad . \quad (18)$$

目标物体表面的偏振度为:

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_{SR} - I_{PR}}{I_{SR} + I_{PR}} \\ &= \frac{(R_s \cdot I_r + \varepsilon_s \cdot I_e) - (R_p \cdot I_r + \varepsilon_p \cdot I_e)}{(R_s \cdot I_r + \varepsilon_s \cdot I_e) + (R_p \cdot I_r + \varepsilon_p \cdot I_e)} \\ &= \frac{(R_s - R_p) \cdot (1 - \alpha)}{2\alpha + (R_s - R_p) \cdot (1 - \alpha)} \quad . \quad (19) \end{aligned}$$

对于海水表面,其发射反射比 α 为:

$$\alpha = \frac{I_e}{I_r} = \frac{I_{sea-e}}{I_{air}} \quad , \quad (20)$$

其中海水自身黑体光谱辐射 I_{sea-e} 可由黑体辐射定律求得,大气辐射及天空散射光辐射 I_{air} 可以通过大气辐射模型求得^[19]:

$$I_{air} = \sum_{i=1}^n ([1 - \tau_i(\lambda, \gamma)] J_{\lambda}(T_i) [\prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \gamma)]) \quad , \quad (21)$$

其中 n 为划分大气层总层数, γ 表示天空仰角, $J_{\lambda}(T_i)$ 表示温度为 T_i 的黑体光谱辐射亮度, $\tau_i(\lambda, \gamma)$ 为第 i 层大气透过率. 则海水表面的发射反射比 α 为:

$$\alpha = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot (e^{hc/(\lambda kT_{sea})} - 1) (\sum_{i=1}^n \{ [1 - \tau_i(\lambda, \gamma)] J_{\lambda}(T_i) [\prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \gamma)] \})} \quad . \quad (22)$$

选取不同的 α 值,分别为 0.8、1、1.2、1.5、2,对不同探测角度下水体表面的偏振度进行仿真,如图6所示:

图6中偏振度为正数,表示偏振方向以平行方向为主;偏振度为负数,表示偏振方向以垂直方向为主.从图中可以看出,偏振度的大小与发射反射比 α 有关,当 α 大于 1 时,红外辐射能量以水体自身的发射为主,此时偏振方向为平行方向;当 α 小于 1 时,红外辐射的能量以水体表面对外界能量的反射为主,此时偏振方向为垂直方向. α 取值越接近 1,反

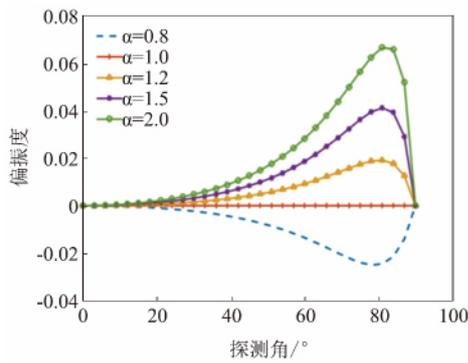


图6 发射反射比 α 不同取值时水体表面偏振度仿真图
Fig.6 The simulation curves of the degree of polarization of ideal water surface in different value of α

射的能量和发射的能量越接近,偏振度越小。

3 海面场景偏振度仿真分析及实测数据验证

3.1 基于 RadthermIR 的海面场景长波红外偏振度仿真

偏振度的大小取决于发射反射比 α , 而海面场景发射反射比 α 的大小由大气环境辐射值、海水自身热辐射值决定。利用公式(22)可以计算出发射反射比, 但是计算过程较为复杂。RadthermIR 是一款基于热辐射、对流换热和热传导三种传热方式, 可以模拟不同地理位置太阳照射、云层遮挡和散射等自然环境和天气条件的影响, 能够快速计算各场景下温度变化以及红外辐射强度瞬态分布状况的软件。本文利用 RadthermIR 仿真软件, 对海面场景中长波红外辐射进行仿真。根据仿真结果, 基于本文提出的偏振度计算模型, 实现对海面及舰船的偏振度定量仿真和计算。

3.1.1 基于表面微元的海面场景偏振度仿真

为了利用本文提出的偏振度模型实现对海水表面以及舰船目标表面进行长波红外偏振度的仿真, 我们设计了如下步骤:

步骤一: 利用 3Dmax 构建海面场景 3D 模型, 并获取表面微元坐标及法线等信息;

如图 7 所示, 利用 3Dmax 构建海面背景和舰船目标 3D 模型, 并将海水表面和舰船目标表面划分成一个个微小面元, 然后导出各个表面微元的坐标以及法线方向。

步骤二: 利用 RadthermIR 对海面场景进行红外辐射亮度仿真, 求取每个表面微元的辐射亮度;

通过导入 3Dmax 模型, 并设置相应的仿真条件: 本文中目标场景地理位置设为北纬 N24.3, 东经

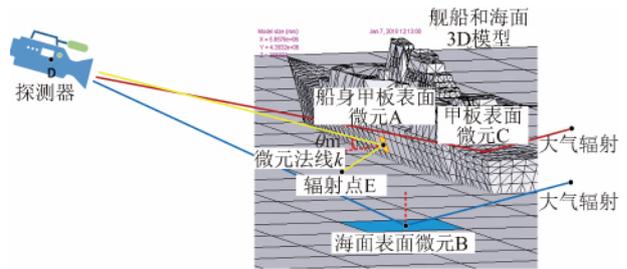


图7 海面背景和舰船目标 3D 模型及表面微元反射过程示意图

Fig.7 3D model of sea scenario and sketch map of surface micro-element reflection process

E118.1, 东八区(实际测量点坐标位置); 环境条件: 云雾厚、多雨、风力大、湿度大, 波长范围: 10 ~ 12 μm 。然后对海面背景和舰船目标的红外辐射亮度进行仿真, 仿真生成的红外辐射图像如图 8 所示。

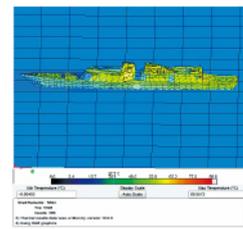


图8 海面场景红外辐射仿真结果

Fig.8 Simulation of infrared radiation from sea scenario

步骤三: 根据探测器位置以及表面微元坐标和微元法线方向求取探测角和发射反射比;

如图 7 所示, 表面微元探测角 θ_m 由微元法线矢量 k 和探测器坐标方位矢量 BA 夹角确定。

$$\theta_m = \langle k, BA \rangle \quad (23)$$

其中 m 表示表面微元序号, $\langle \cdot \rangle$ 表示矢量求夹角运算。

求解得到表面微元探测角 θ_m 之后, 利用公式(7)和(8)可以分别求出垂直分量反射率 R_s 和平行分量反射率 R_p 。表面微元 B 处的发射反射比 α_m 由微元 B 自身红外发射能量 I_B 和反射能量的比值求得。根据菲涅尔反射定律, 微面元 B 反射的能量等于反射面内入射角为 θ_m 的微面元 E 点处红外辐射的能量 I_E :

$$\alpha_m = \frac{I_B}{I_E} \quad (24)$$

步骤四: 求解得到表面微元垂直分量反射率 R_s 、平行分量反射率 R_p 以及发射反射比 α_m 之后, 利

用公式(19)计算得到海面背景和舰船目标各部分表面微元的偏振度。

根据以上步骤,可以仿真得出海面背景和舰船目标任意部位表面微元的偏振度数值。为了定量比较该方法的有效性,我们分别选取船身表面微元 A、海面表面微元 B、和甲板表面微元 C 进行仿真计算,仿真计算结果如表 1 所示。表 1 的结果显示,船身部位的偏振度较小,这是由于船身在红外发射能量的同时,还强烈反射了来自海面的辐射能量,导致发射反射比值较小,因此船身部位的偏振度较小。相对于船身部位,海水表面较为光滑,反射的大气辐射远小于水体自身的红外发射,所以海面表现出较强的偏振度。舰船的甲板部位由于折射率大于水体,同时其发射反射比也大于水体,所以表现为最强的偏振度。通过对比海面和舰船不同部位微元的仿真数据和实测数据可以看出,两者具有较好的一致性,验证了该模型的实用性和有效性。由于舰船结构复杂,各部分红外辐射之间存在较强的相互影响,使得船身部位微元的仿真结果与实测结果之间的偏差略微大些。进一步比较红外偏振度图像图 9(b) 和红外强度图像图 9(a) 可以看出,舰船目标和海面之间偏振特征的差异相对于红外强度特征更为明显,目标与背景之间的对比度更高,而且在偏振度图像中,舰船目标的立体感更强,因此偏振特征能够为目标的增强、检测和识别提供有效的多维信息。

表 1 不同部位表面微元红外偏振度仿真数值和实测数值对比

Table 1 The comparison result of different micro-element between simulation data and experimental data

	仿真图像	实测图像	误差
船身部位表面微元 A 偏振度数值	0.008 3	0.009 2	9.78%
海面背景表面微元 B 偏振度数值	0.028 4	0.027 5	3.27%
甲板部位表面微元 C 偏振度数值	0.046 7	0.043 6	7.11%

3.2 不同时间段内、不同观测角下海面场景偏振特征分析

为了综合验证本文提出的偏振度计算模型对于仿真海面背景和舰船目标偏振度的有效性,在本小节中,我们对不同时间段、不同探测角下的海面和船身部位的偏振度变化规律进行了仿真分析。

3.2.1 不同时间段内、不同观测角下海面热辐射仿真结果

图 10 是利用 RadthermIR 仿真得出的不同时间段内海面和舰船辐射亮度变化曲线。从图 10(a) 中可以看出海面辐射能量高于周围环境辐射。由于水

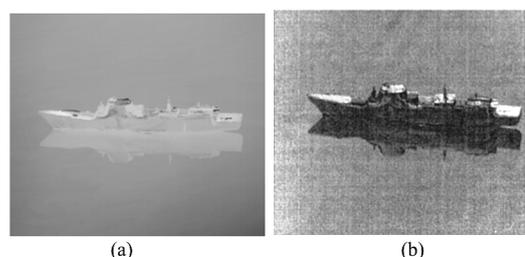


图 9 红外强度图像和红外偏振度图像的仿真及实测结果对比图(a) 实测红外强度图像(b) 实测红外偏振度图像

Fig. 9 The comparison between simulation results and experimental results of infrared intensity images and polarization images: (a) The experimental results of infrared intensity images. (b) The experimental results of polarization images

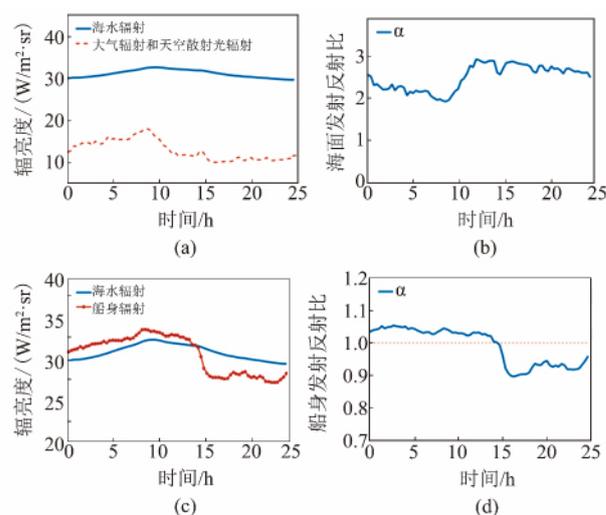


图 10 不同时间段内海面和舰船辐射亮度仿真结果及发射反射比曲线(a) 海面及大气环境辐射(b) 海面发射反射比曲线(c) 船身及海面辐射亮度(d) 船身发射反射比曲线
Fig. 10 The radiance and ratio of emission to reflection of sea surface and ship target in different time: (a) The radiance of sea surface and atmospheric environment. (b) The ratio of emission to reflection of sea surface. (c) The radiance of sea surface and ship target. (d) The ratio of emission to reflection of ship target

体比热容较大,所以海面辐射变化缓慢,而环境辐射受气象条件(云雾、湿度、风力、光照)影响较大,变化较为剧烈。白昼时,温度较高,环境辐射能量大;夜晚时,环境辐射能量较小。根据图 10(a) 的仿真结果,可以计算出海面的发射反射比曲线如图 10(b) 所示。图 10(c) 是船身辐射和海水辐射的仿真结果,舰船漂浮在海面之上,与海水存在热传递,所以船身的辐射和海面辐射较为接近。由于船身(材质为金属)比热容小于海面,因此白天船身辐射强于海面辐射,而晚上海面辐射强于船身辐射。根据图 10(c)

的仿真结果,可以计算出舰船船身的发射反射比曲线如图 10(d) 所示.

3.2.2 海面场景偏振度仿真数据及实测数据对比分析

根据海面背景和船身目标的发射反射比曲线,利用本文提出的偏振度计算模型,可以求出不同时间段、不同探测角下的海面背景和船身的偏振度.图 11(a) 是根据图 10(b) 和图 10(d) 的发射反射比曲线,选取探测角为 60° 仿真得到的一昼夜内海面及舰船目标偏振度变化曲线.图 11(a) 显示,尽管海面背景和舰船目标的偏振度随红外热辐射的变化有所起伏,但是海面的偏振度始终大于舰船目标的偏振度.图 11(b) 是选取图 10(b) 和图 10(d) 中下午 15:00 时的发射反射比,仿真得出的不同探测角下(40°~80°) 的海面以及舰船目标偏振度曲线.图 11(b) 仿真结果显示,海面背景以及舰船目标的偏振度都随探测角度的增加而增大.

为了验证仿真结果的可靠性,我们对海面场景的偏振度进行了实际测量.测量时间和地点与 RadthermIR 设置的时间地点相同.图 11(c) 是探测角为 60° 时不同时间段内海面场景偏振度实际测量结果;图 11(d) 是下午 15:00 时不同探测角下(40°~80°) 海面背景和舰船目标实际测量结果.图 11(e) 和

图 11(f) 是传统基于红外发射的偏振度计算模型与本文提出的偏振度计算模型在计算海面偏振度时的对比结果.通过分析图 11 中的仿真数据和实测数据可以看出,传统的基于红外发射的偏振度计算模型由于没有考虑海面反射大气环境辐射时的去偏效应,无法反映出大气辐射变化对海面偏振度的影响,同时计算出的海面偏振度要大于实际测量的偏振度.而本文提出的结合红外反射效应和发射效应共同作用的偏振度模型不仅计算的结果与实测结果具有较好的拟合度,而且还能够仿真出海面背景与舰船目标之间在不同时间段内、不同探测角度下偏振度差值,为利用偏振度特征对舰船目标进行增强提供良好的数据分析基础.

3.2.3 偏振度模型仿真值与其他文献实测数据对比

文献 [20] 对海面偏振效应进行了相关研究,同时对不同探测角下红外长波波段的海面偏振度进行了精准测量,测量结果如图 12 所示.图 12 中 Δ 和 * 分别是参考文献 [25] 在 11.5~12.5 μm 波段和 10.3~11.5 μm 波段海水表面偏振度的实际测量值,实线表示基于偏振模型得出的仿真值(其中发射反射比 $\alpha = 2$),通过对比本文模型仿真曲线和参考文献的测量值可以看出两者具有较好的一致性,表明该

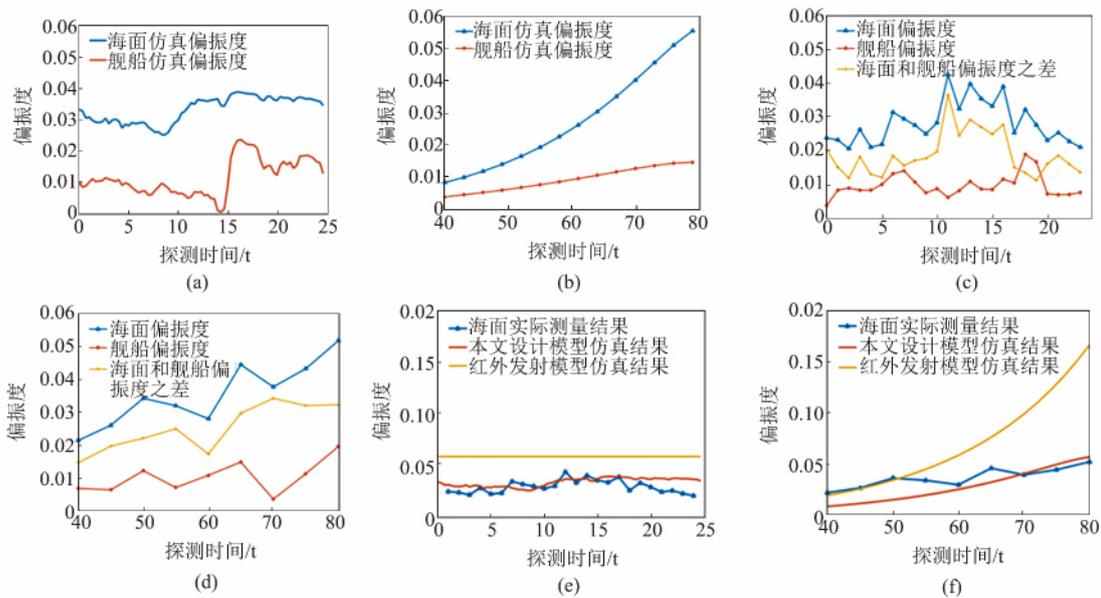


图 11 不同时间段、不同的观测角下海面场景偏振度变化规律 (a) 不同时间段内偏振度变化仿真结果 (b) 不同探测角度下偏振度仿真结果 (c) 不同时间段内偏振度变化实测结果 (d) 不同探测角度下偏振度实测结果 (e) 不同时间段海面偏振度仿真与实测结果对比图 (f) 不同探测角海面偏振度仿真与实测结果对比图

Fig. 11 The varying regulation of the degree of polarization in different detected angle and different time: (a) The simulation results in different time. (b) The simulation results in different detected angle. (c) The experimental results in different time. (d) The experimental results in different detected angle. (e) The comparison between simulation and experimental result in different time. (f) The comparison between simulation and experimental result in different time

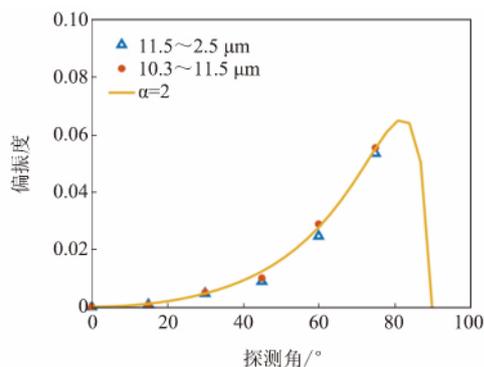


图 12 文献[20]测量值与本文模型仿真结果对比
Fig. 12 The comparison between experimental data in Ref. [20] and simulated data based on the proposed model

模型能够有效仿真出海面在不同探测角下的偏振度 因此提出的偏振度计算模型具有较好的实用性.

4 结论

红外偏振现象是由物体表面的红外发射和反射效应产生的. 红外发射产生的偏振以平行方向为主, 红外反射产生的偏振以垂直方向为主. 本文根据表面微元双向反射分布函数 BRDF, 对物体偏振效应进行了分析, 然后结合菲涅尔定律、基尔霍夫定律等对偏振产生的原理进行了详细论述, 并依据原理对偏振状态进行了数学建模. 随后利用建立的偏振度计算模型, 仿真了不同时间段、不同探测角度下海面背景和舰船目标的偏振度, 仿真结果表明水面的偏振度明显大于舰船船身的偏振度, 且偏振度的数值随探测角的增加而增大. 最后我们通过实际测量数据对仿真结果进行了验证, 结果表明提出的结合红外反射和发射效应的偏振度计算模型能够有效计算出海面背景和舰船目标的偏振度信息, 为海面场景中偏振度的分析和应用提供有力的依据.

References

[1] QIU Tiao-Wen, ZHANG Yan, YANG Wei-ping, et al. Method for feature extraction and small target detection based on infrared polarization [J]. *Laser & Infrared* (邱晓文, 张焱, 杨卫平, 等. 基于红外偏振的特征提取与小目标检测方法. *激光与红外*), 2014(10): 1154-1158.

[2] SHAO Wei-Dong, WANG Pei-Gang, ZHENG Qin-Bo, et al. Polarimetric calibration airborne remote sensing polarimeters [J]. *J Infrared Millim. Waves* (邵卫东, 王培纲, 郑亲波, 等. 机载偏振遥感仪的偏振定标. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(2): 137-140.

[3] ZHANG Chao-Yang, CHENG Hal-Feng, CHEN Zhao-Hui, et al. Detecting low reflectivity camouflage net by using polarization remote sensing [J]. *J Infrared Millim. Waves* (张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥识别低反射率伪装

网研究. *红外与毫米波学报*) 2009, 28(2): 137-140.

[4] Kristan P Gurton, Achid Dahmani. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission [J]. *Applied Optic* (S0003-6935), 05, 4(26): 361-367.

[5] M. Sidran. Broadband reflectance and emissivity of specular and rough water surfaces [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(18): 3176-3183.

[6] J. A. Shaw, C. Marston. Polarized infrared emissivity for a rough water surface [J]. *Opt. Exp.*, 2000, 7(11), 2000: 375-380.

[7] J. A. Shaw. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers [J]. *Appl. Opt.* 1999, 38: 3157-3165.

[8] A. W. Cooper, E. C. Crittenden, Jr., E. A. Milne, et al. Mid and far infrared measurements of sun glint from the sea surface [J]. *Optics of the Air-Sea Interface*, L. Estep, ed., Proc. SPIE, 1992, 1749: 176-185.

[9] A. W. Cooper, Lentz, P. L. Walker. Infrared polarization measurement of ship signature and background contrast [J]. *SPIE*, 1994, 2223: 301-309.

[10] P. L. Walker, W. J. Lentz, A. W. Cooper. Atmospheric and sea state dependence of polarized infrared contrast [J]. *Proc. SPIE*, 1995, 2469: 393-403.

[11] Priest R G, Gerner T A. Polarimetric BRDF in the Microfacet Model: Theory and Measurements [J]. *In Proceedings of the Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors*, 2000.

[12] Wei-Li CHEN, Qiu-Ju SUN, Shu-Hua WANG, et al. Influence Analysis of Target Surface Emissivity on infrared Radiation Polarization Characteristics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (陈伟力, 孙秋菊, 王淑华, 等. 目标表面发射率对红外辐射偏振特性的影响分析. *光谱学与光谱分析*). 2017, 37(3): 737-742.

[13] CHEN Wei-Li, WANG Shu-Hua, JIN Wei-Qi, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory [J]. *J Infrared Millim. Waves* (陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面理论的红外偏振特性研究. *红外与毫米波学报*), 2014, 33(5): 507-514.

[14] B. Fougnie, R. J. Frouin, P. Y. Deschamps, et al. Measurement and computations of the polarized marine reflectance [C]//SPIE, 2000, 4133: 191-201.

[15] Kong N, Tai Y W, Shin S Y. High-Quality Reflection Separation Using Polarized Images [J]. *IEEE Press*, 2011.

[16] Wolff L B. Polarization-Based material classification from specular reflection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1990, 12(11): 1059-1071.

[17] Andrew resnick, Chris persons, George Lindquist. Polarized emissivity and kirchhoff's law [J]. *Applied optics*. 1999, 38(8): 1384-1387.

[18] Oscar Sandus. A Review of Emission Polarization [J]. *Applied Optics* (S0003-6935), 1965, 4(12): 1634-1642.

[19] Liu-Miao LI. Research on infrared radiation characteristic of object under sky and sea background (D), Xidian University (李刘苗. 海天背景目标红外辐射特性研究. 西安电子科技大学) 2011.

[20] Yun-Feng LU. The study of the polarization characteristics of water (D), Northeast Normal University. (吕云峰. 水体的偏振特性研究. 东北师范大学) 2012.