

基于海浪谱建模的海面偏振仿真研究

宿德志¹, 吴世永¹, 刘亮^{2*}, 刘陵顺¹

¹ 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001;

² 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001

摘要 分别采用 PM 谱、Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱建模获得海面模型, 结合中国台站实测数据, 利用软件计算了海水辐射和天空大气辐射, 对比研究了不同海浪谱下, 风速和探测角等因素对海面长波红外偏振特性的影响, 仿真结果表明: 海面长波红外偏振特性昼夜变化较大, PM 谱在探测角为 80° 时, 海面平均偏振度取得最大值, 而 Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱对应的探测角为 70°。在相同条件下, Jonswap 谱和 Elfouhaily 各微面元入射角分布相对集中, 其平均偏振度高于 PM 谱。随着风速的增加, 各微面元入射角的分布几乎对称地向两侧拓展, 使得 PM 谱探测角为 63° 时, 海面平均偏振度基本不受风速的影响, Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱对应的探测角为 56°, 当探测角大于这一特定角度时, 偏振度随风速增加而减小, 当探测角小于这一角度时, 偏振度随风速增加而增加。因此选用不同海浪谱进行海面建模时, 仿真得到的海面偏振特性也会有所不同, 实际中应根据需模拟的海面场景特点来选择合适的海浪谱, 以确保仿真结果的可靠性。

关键词 海洋光学; 长波红外; 海面; 偏振度; 海浪谱

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1411001

Ocean Wave Spectrum Modeling-Based Sea Surface Polarization Simulation

Su Dezhi¹, Wu Shiyong¹, Liu Liang^{2*}, Liu Lingshun¹

¹ College of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China;

² Coast Guard College, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract In this article, the PM, Jonswap, and Elfouhaily spectra were used to model the sea surface, and combining them with the measured data from Chinese stations, the radiances of seawater, sky, and atmosphere were calculated. The effects of wind speed and detection angle on the long-wave infrared polarization characteristics of the sea surface under different wave spectra were studied. Simulation results show that the long-wave infrared polarization characteristics of sea surface vary significantly during the day and night. When the detection angle of the PM spectrum is 80°, the average polarization degree of the sea surface reaches the maximum, while the corresponding detection angle for the Jonswap and Elfouhaily spectra is 70°. Under the same conditions, the incident angle distribution of the Jonswap and Elfouhaily spectra is relatively concentrated, and their average degree of polarization is higher than that of the PM spectrum. When the detection angle is 63°, the average degree of polarization of the sea surface modeled by the PM spectrum is unaffected by wind speed. The corresponding detection angle of the Jonswap and Elfouhaily spectra is 56°. When using different wave spectra to model the sea surface, the polarization characteristics of the simulated sea surface will be different. Therefore, the appropriate wave spectrum should be selected according to the characteristics of the sea surface scene to ensure the reliability of simulation results.

Key words ocean optics; long wave infrared; sea surface; polarization degree; ocean wave spectrum

OCIS codes 010.0280; 040.3060; 260.5430

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-11-14; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11704411)

通信作者: *liul513@126.com

1 引言

随着红外技术的发展,红外偏振成像技术逐步成为近年来国内外研究的热点,并在复杂背景下的目标探测中展现出广泛的应用前景^[1]。目前,国内红外偏振探测的研究热点是金属、表面涂层的偏振特性^[2-5]以及偏振系统的设计^[6-7],而对海面偏振特性的研究较少。事实上,在海面复杂场景下偏振成像比普通红外成像能探测到范围更广的目标^[8],研究海面红外偏振特性对复杂海况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都具有重要意义^[9]。

海面红外偏振特性通常用双向反射分布函数进行描述,因为海浪的尺度要大于红外波段的尺度,故可以用几何光学近似来解决问题,一般采用基于微面元理论的 Cook-Torrance 模型^[10]来解决。该模型将海面分成很多个微小面元,每个微面元可近似看作为镜面反射,服从菲涅耳反射定律,因此海面形状对海面偏振特性具有很大影响,马小莉^[11]基于 PM 谱和 Jonswap 谱建立了海面模型,但是并没有给出两种模型下海面偏振特性的差别。苏翔^[12]和吴庚坤^[13]分别采用 Elfouhaily 谱和文氏改进谱建立了海面模型,分析了其电磁散射特性,张延冬等^[14]根据 Jonswap 谱模拟了海面形状并计算了光散射。可以发现,大多数的海浪谱都是由大量实测数据总结得到的半经验谱,都具有一定的适用范围,而选用不同海浪谱建立的海面模型通常是不同的,从而会影响海面偏振特性。

本文选取具有代表性的 PM 谱、Jonswap 谱^[15]和 Elfouhaily 谱^[12]来研究不同海浪谱对海面偏振特性的影响,首先采用快速傅里叶变换法模拟海面形状,利用 Radtherm 软件,结合中国台站实测数据计算了不同条件下海面辐射和天空大气辐射,并根据建立的偏振度计算模型,对比仿真了海浪谱、风速和探测角等因素对海面偏振特性的影响。

2 海浪谱

1) PM 谱

PM 谱是海洋学中常用的完全发展海谱,同时也是最早既考虑毛细波又考虑重力波的海谱模型之一。它是 Pierson 和 Moskowitz 于 1964 年通过对北大西洋的观测得到的,表达式为

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^5}{\omega^2} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{v\omega} \right)^4 \right], \quad (1)$$

式中:常数 $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, v 为平均风速, g 为重力加速度, ω 为频率。

2) Jonswap 谱

该谱是基于由德、英、美、荷等国的有关组织于 1968—1969 年进行的“联合北海波浪项目”系统测量而提出的,描述了有限风区持续成长的海浪,是在 PM 谱的基础上对重力波谱区域进行修正得到的,表达式为

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2} \right], \quad (2)$$

其中: ω_0 为谱峰频率, $\omega_0 = 22 \left(\frac{g^2}{Fv} \right)^{0.33}$; γ 为谱峰增强因子,其平均值为 3.3; a 为尺度系数, $a = 0.076 \times (v^2/Fg)^{0.22}$, F 为风区长度, v 为海面 10 m 高处的平均风速, σ 为峰形参量, $\sigma = \begin{cases} 0.77, & \omega \leq \omega_0 \\ 0.09, & \omega > \omega_0 \end{cases}$ 。

3) Elfouhaily 谱

Elfourhaily 等综合 PM 谱、JONSWAP 谱和 Apel 谱,提出了联合谱函数,表达式为

$$S(k) = (B_L + B_H)/k_0^3, \quad (3)$$

其中 B_L 和 B_H 分别代表重力波对应的低频无方向曲率谱和毛细波对应的高频无方向曲率谱, k_0 为海浪谱的波数。

3 海面建模

常用的海浪谱建模方法主要包括两种,线性叠加法和线性滤波法,这两种方法能够反映海浪的随机特性,并且线性滤波法的建立是在快速傅里叶变换(FFT)基础之上,故线性滤波法能够比较迅速地仿真不同风向和不同风速下的大尺度海浪的起伏特性,在海浪实时模拟等方面得到了广泛应用。本研究采用线性滤波法模拟海面,该方法需要对白噪声进行傅里叶变换,然后在频域内进行滤波,最后作傅里叶逆变换,从而得到海面高度场分布。具体仿真过程如下:设二维随机粗糙海面在 x 和 y 方向的长度分别为 L_x 和 L_y , M, N 为等间隔的离散点,则相邻点的间距 $\Delta x = L_x/M$, $\Delta y = L_y/N$,对海面上每点的坐标可以表示为

$$\begin{aligned} x_m &= m \Delta x; y_n = n \Delta y; \\ m &= -M/2 + 1, -M/2 + 2, \dots, M/2; \\ n &= -N/2 + 1, -N/2 + 2, \dots, N/2; \end{aligned} \quad (4)$$

则海面高度场函数可以表示为^[13]

$$\begin{cases} f(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_k=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n_k=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_k}, k_{n_k}) \exp[i(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)] \\ F(k_{m_k}, k_{n_k}) = \begin{cases} 2\pi[L_x L_y S(k_{m_k}, k_{n_k})]^{1/2} \times \frac{[N(0,1) + iN(0,1)]}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2, n_k \neq 0, N/2 \\ 2\pi[L_x L_y S(k_{m_k}, k_{n_k})]^{1/2} \times N(0,1), & m_k = 0, M/2, n_k = 0, N/2 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $S(k_{m_k}, k_{n_k})$ 为二维粗糙海面的方向谱,且 $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x, k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y, N(0,1)$ 表示满足均值为 0, 方差为 1 的高斯分布。为使 $f(x_m, y_n)$ 为实数,需要傅里叶系数满足关系式 $F(k_{m_k}, -k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, k_{n_k})$ 和 $F(k_{m_k}, k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, -k_{n_k})$ 。本文研究的海浪功率谱采用 PM 谱、Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱,方向扩展函数采用 ITTC 谱^[15] 和双边方向谱^[12]。

4 海面场景长波红外偏振模型

图 1 给出海面红外辐射模型,从图中可以看出,对于海面来说,进入探测器的能量分为 4 部分:海水热辐射 I_e 、海面反射的太阳辐射 I_s 、海面反射的大气天空散射光辐射 I_r 、海面到传感器之间的路程辐射 I_{atp} ,探测器接收到的辐射能量的表达式为

$$I_d = \tau(\epsilon I_e + R I_s + R I_r) + I_{atp}, \quad (6)$$

其中 τ 为大气透过率, ϵ, R 分别为海面发射率和反射率。由于长波红外波段太阳辐射能量较少,若避开耀光区域,可暂不考虑太阳辐射 I_s 的影响,同时由于路程辐射 I_{atp} 中,总体上没有表现出偏振现象,对海面场景偏振效应的影响很小^[16],因此这里只考虑海水热辐射 I_e 和大气天空散射光辐射 I_r 两个影响因素。第 i 个海面微面元的偏振度可表示为

$$D_i = \left| \frac{I_{pi} - I_{si}}{I_{pi} + I_{si}} \right|, \quad (7)$$

其中, I_{pi} 表示微面元 i 反射和辐射产生的 p 波总

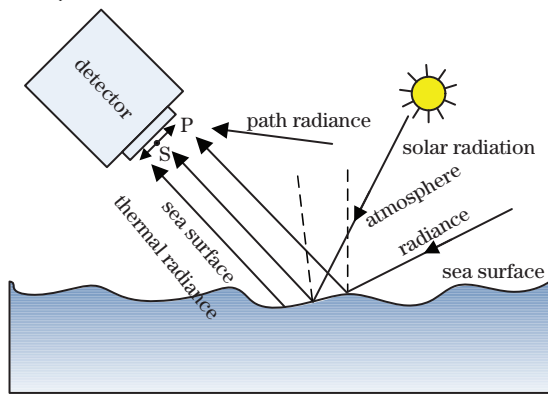


图 1 海面红外辐射模型

Fig. 1 Model of sea water infrared radiation

和, I_{si} 表示微面元 i 反射和辐射产生的 s 波总和。 I_{pi} 和 I_{si} 的计算方法如下:

$$\begin{cases} I_{pi} = R_{pi} \cdot I_{ri} + \epsilon_{pi} \cdot I_{ei} \\ I_{si} = R_{si} \cdot I_{ri} + \epsilon_{si} \cdot I_{ei} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, R_s, R_p 分别为平行入射面和垂直入射面分量的反射率。由于海水会吸收光波,其折射率为复数,即 $\tilde{n} = n + ik$,长波红外波段(8~12 μm)的海水折射率可取为 $\tilde{n} = 1.21 + i0.05$ ^[16],则有

$$\begin{cases} R_s = \frac{(n - \cos \theta_i)^2 + k^2}{(n + \cos \theta_i)^2 + k^2} \\ R_p = \frac{\left(n - \frac{1}{\cos \theta_i}\right)^2 + k^2}{\left(n + \frac{1}{\cos \theta_i}\right)^2 + k^2} \end{cases}. \quad (9)$$

根据基尔霍夫定律,当光入射到不透明物体时,其发射率和反射率之和为 1,即

$$\begin{cases} \epsilon_p + R_p = 1 \\ \epsilon_s + R_s = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

定义辐射反射比 α_i 为

$$\alpha_i = \frac{I_{ei}}{I_{ri}},$$

则有

$$D_i = \left| \frac{I_{pi} - I_{si}}{I_{pi} + I_{si}} \right| = \left| \frac{(R_{pi} - R_{si})(I_{ri} - I_{ei})}{2I_{ei} + (R_{pi} + R_{si})(I_{ri} - I_{ei})} \right| = \left| \frac{(R_{pi} - R_{si})(1 - \alpha_i)}{2\alpha_i + (R_{pi} + R_{si})(1 - \alpha_i)} \right|. \quad (11)$$

由(11)式可知,微面元的偏振度与面元的入射角 θ_i 和辐射反射比 α_i 有关。由菲涅耳反射定律和基尔霍夫定律可知,在红外反射过程中,其垂直分量始终大于平行分量,而在红外发射过程中,其平行分量始终大于垂直分量。因而综合考虑反射和发射过程,当辐射反射比 $\alpha_i = 1$ 时,其偏振度为零;当 $\alpha_i < 1$ 时,反射光强大于辐射光强,偏振光垂直分量大于平行分量;当 $\alpha_i > 1$ 时,辐射光强大于反射光强,偏振光垂直分量大于平行分量。

5 RadTherm 仿真

根据前述分析,可知海面场景偏振度计算需要

求解 α_i , 而通常情况下由于大气辐射和天空散射光辐射 I_{ri} 的影响因素较多, 其近似模型很复杂, 因此求解 α_i 较为困难。本研究采用 RadTherm 软件仿真来计算海面场景的长波红外偏振特性。RadTherm 是一个专业的热分析软件, 可以快速准确地求解各个场景下的瞬态温度分布和辐射强度, 张景华等^[16-17] 验证了 RadTherm 软件在部分场景下计算结果的可靠性。本文通过 (5) 式建立海面三维模型, 并将中国台站实测海面温度和气象数据导入 RadTherm 软件, 从而计算出不同经纬度、海拔高度、天气状况、云层等实际环境因素影响下, 海面模型各微元的辐射情况。因而采用这种仿真方法可以忽略复杂的环境辐射影响, 快速计算出海面场景下的 α_i , 此外实测数据的引入也便于和实验数据进行对比, 具体仿真流程如下。

5.1 仿真流程

分别采用 3 种海浪谱生成不同风速下的海面高度场模型, 仿真的海面区域为 512 m × 512 m, 两个方向的采样点数目均为 512 个。

1) 由于高度场模型无法直接导入 RadTherm 软件, 需要将高度场模型转化为面元数据, 本研究将粗糙海面分割为 522242 个三角形面元, 并建立 obj 模型文件, 同时计算出每个面元的法线方向。

2) 将 obj 模型文件导入 RadTherm 软件, 并根据中国台站实测海面温度数据 (图 2) 和气象数据编辑成天气文件, 导入到该软件中。仿真波长设置为 8~12 μm , 仿真计算后可以得到每个面元的辐射亮度和大气天空散射光辐射亮度, 部分仿真结果如图 3 所示。

3) 根据探测器位置和每个面元的法线方向求解出各面元的入射角 θ_i , 根据菲涅耳反射定律可得到 R_{pi} 和 R_{si} , 再利用 RadTherm 计算出的辐射亮

度、大气辐射和天空散射光辐射亮度, 应用 (11) 式, 求解出该面元的 D_i 。

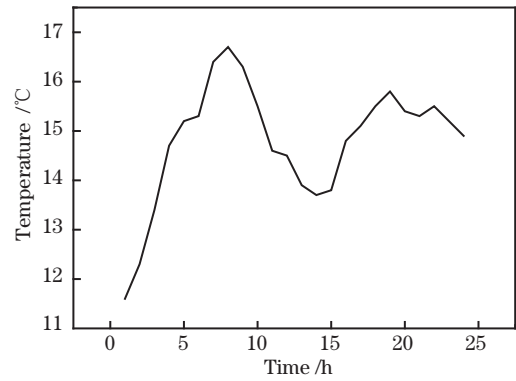


图 2 24 h 海面温度变化曲线

Fig. 2 24-hours curve of sea-surface temperature

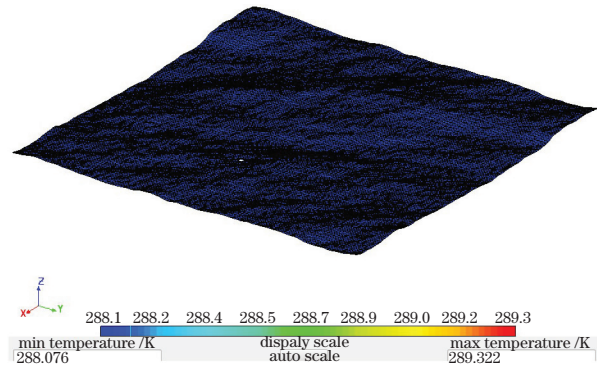


图 3 海面红外辐射仿真结果

Fig. 3 Simulation of sea water infrared radiation

5.2 仿真结果

图 4(a) 给出仿真得到的海面场景辐亮度变化曲线, 可以发现海面的辐亮度较大, 也就是说发射强度大于反射强度, 因此长波红外波段偏振光垂直分量大于平行分量, 而且海水比热容大, 昼夜温差小, 因此海面辐亮度变化相比于天空大气辐亮度变化较小。图 4(b) 为根据仿真结果计

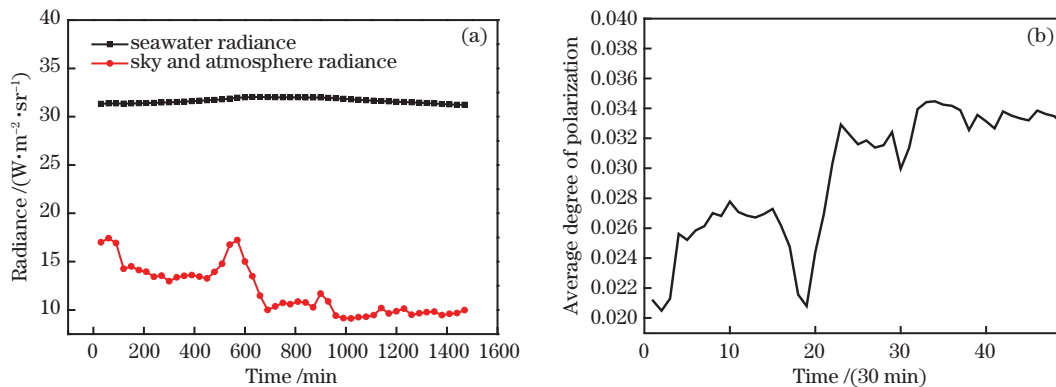


图 4 不同时间内海水和天空大气辐亮度、平均偏振度变化曲线。(a) 24 h 海水和天空大气辐亮度; (b) 24 h 海面平均偏振度

Fig. 4 Radiance of seawater, sky and atmosphere with average degree of polarization in different time.

(a) Radiance of seawater, sky and atmosphere in 24 h; (b) average degree of polarization of sea surface in 24 h

算的风速为 10 m/s,探测角为 45° 时海面的 24 h 平均偏振度变化曲线,可以发现在夜间由于天空和大气辐亮度降低,其平均偏振度增加较为明显。

5.2.1 稳定性

由于 RadTherm 软件只能导入固定的模型文

件,而粗糙海面是动态变化的,即使相同风速和气象条件下,其表面形状也是不断变化的,为验证本文仿真方法的稳定性,在相同风速条件下,基于 PM 谱随机生成了 10 个不同的海面模型,应用 RadTherm 软件进行仿真,其偏振度结果如图 5 所示。

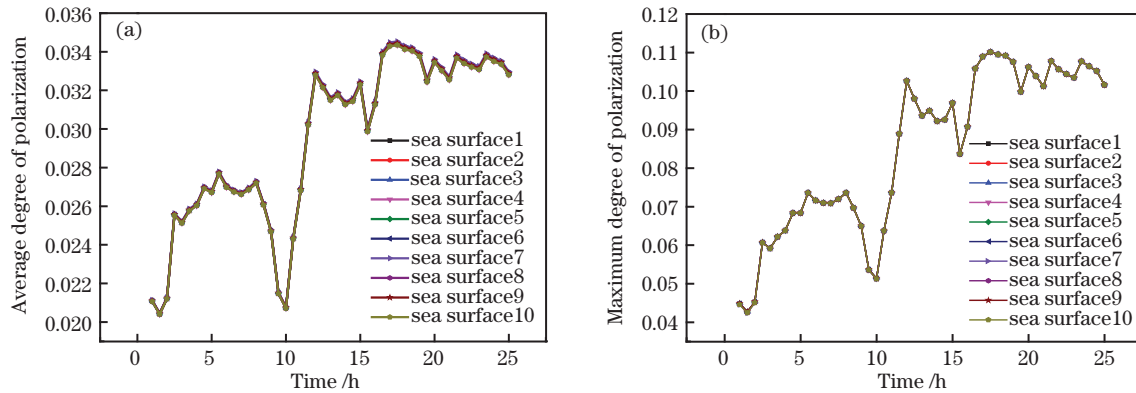


图 5 不同海面模型平均偏振度和最大偏振度的时间变化曲线。(a)平均偏振度;(b)最大偏振度

Fig. 5 Average and maximum degree of polarization in different time. (a) Average degree of polarization; (b) maximum degree of polarization

从图 5 可以看出,虽然随机生成的 10 个海面高度场模型是不同的,但是其平均偏振度和最大偏振度等参数是一致的,也就是说这种仿真方法是稳定的。

5.2.2 不同海浪谱下风速对偏振度的影响

根据菲涅耳反射定律,可知当入射角为布儒斯

特角时,反射光会达到最大偏振度,若同时考虑发射偏振和反射偏振,能够达到的最大偏振度的探测角一般约为 80° ^[18]。为研究风速对海面的各微面元法向与竖直方向夹角的影响,模拟了风速分别为 1, 5, 10, 15, 20, 23 m/s 时各个探测角下的平均偏振度,结果如图 6 所示。

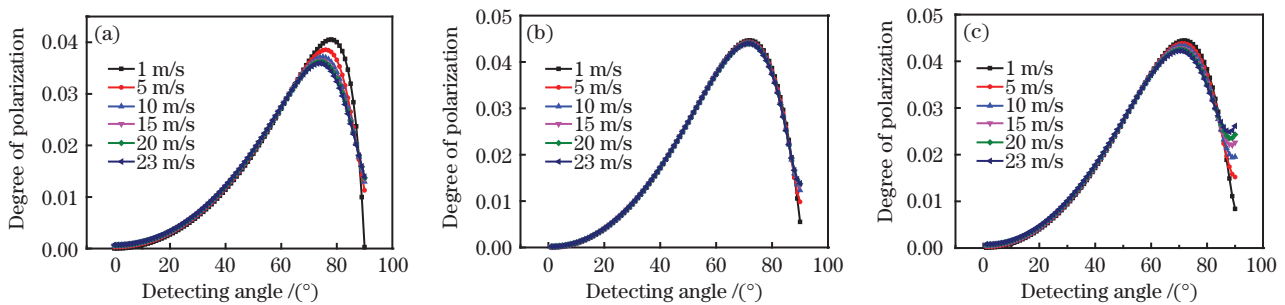


图 6 不同风速下偏振度与探测角的关系。(a) PM;(b) Elfouhaily;(c) Jonswap

Fig. 6 Degree of polarization versus detecting angle with different wind speeds. (a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

从图 6 可以看出,随着风速的增加,PM 谱和 Jonswap 谱的峰值偏振度减小,对应的探测角也减小,而 Elfouhaily 谱的峰值偏振度和对应的探测角基本不变,PM 谱在探测角为 80° 时取得峰值偏振度,Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱在探测角为 70° 时取得峰值偏振度。为方便对比研究,图 7 给出了风速为 5 m/s 和 10 m/s 时三种海浪谱在不同探测角下的平均偏振度。

从图 7 可以看出,当探测角低于 50° 时 Jonswap

谱和 Elfouhaily 谱生成海面的平均偏振度是一致的,随着风速和探测角的增加,两者差别逐渐增加,而 PM 谱生成海面的平均偏振度明显低于前两者。这是由于 Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱分别修正了重力波区域和毛细波区域,斜率分布更加集中。为了更好地说明这一情况,计算了 60° 探测角下所有面元与探测器轴向的夹角,如图 8 所示。

从图 8 可知,当风速较小时,各面元的入射角分布主要集中在探测角附近,随着风速的增加,入射角

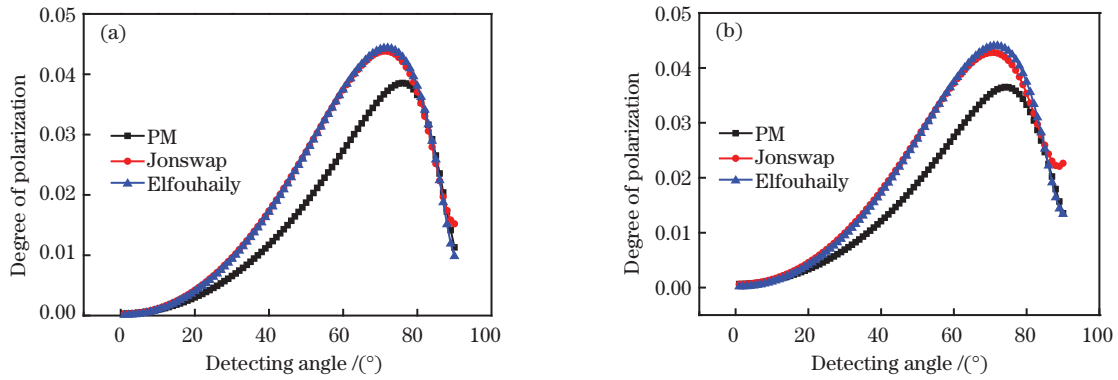


图 7 风速为 5 m/s 和 10 m/s 时的偏振度对比。(a)风速为 5 m/s;(b)风速为 10 m/s

Fig. 7 Comparison of polarization degree of the sea surface at wind speed of 5 m/s and 10 m/s.

(a) Wind speed of 5 m/s; (b) wind speed of 10 m/s

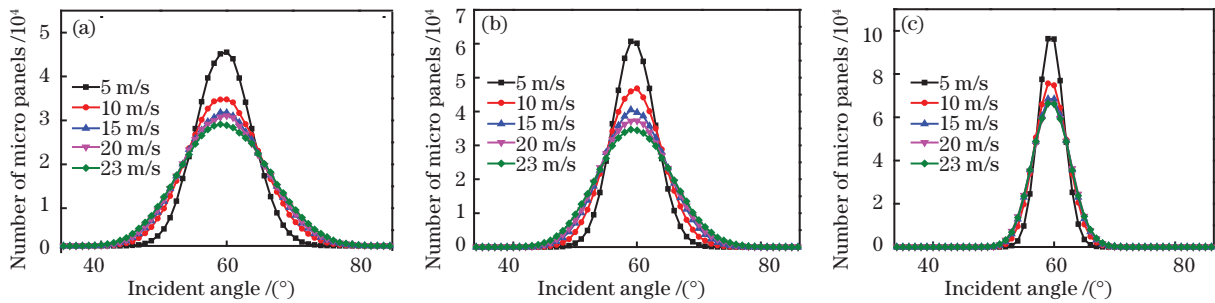


图 8 60°探测角下各入射角微面元数量分布情况。(a) PM;(b) Elfouhaily;(c) Jonswap

Fig. 8 Distribution of incident angles of micro panels at the detecting angle of 60°. (a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

的分布几乎对称地向两侧拓展。为更好地观察三种海浪谱的不同,计算了风速为 10 m/s,探测角为 60°时,各微面元入射角的分布情况,如图 9 所示。

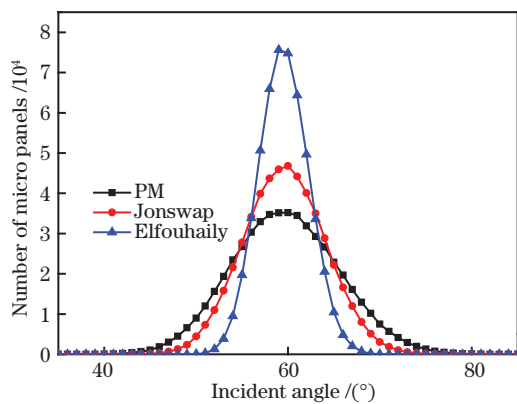


图 9 风速 10 m/s, 探测角 60°时各微面元入射角分布情况

Fig. 9 Distribution of incident angles of micro panels at wind speed of 10 m/s and detection angle of 60°

从图 9 可以看出,三个海浪谱的入射角度分布都以 60°为中心对称分布,其中 Elfouhaily 谱分布较为集中, Jonswap 谱次之, PM 谱分布较为发散,由于探测角小于 70°时,偏振度随着探测角增大而增大,当入射角分布向两侧对称拓展时,向右拓展的面元偏振度会增加,向左拓展的面元偏振度会减小,由

图 6 可知 60°探测角右侧斜率小于左侧斜率,所以向右拓展的面元偏振度增加总和小于向左拓展的面元偏振度减小总和,因此相同条件下,PM 谱由于分布较发散,其平均偏振度要低一些,而 Elfouhaily 谱分布最集中,其平均偏振度最大。

5.2.3 不同海浪谱下探测角对偏振度的影响

为研究探测角对海面偏振度的影响,仿真计算了探测角分别为 40°、60°和 80°时,海面平均偏振度随风速的变化情况,如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,三个海浪谱具有相同的特征:40°探测角时,偏振度随风速增加而增加,60°探测角时偏振度变化较小,80°探测角时,偏振度随风速增加而减小。由此可见,不同探测角下其变化关系不一致。因此,计算了 0°~90°探测角下,风速分别为 4, 10, 15, 18, 20, 23 m/s 时所有面元的平均偏振度差值,如图 11 所示。从图中可以发现,当探测角为 63°时,PM 谱海面平均偏振度基本不受风速的影响,而 Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱在 56°探测角时,平均偏振度受风速的影响最小。所以海面场景的偏振探测应使探测器的工作角度在 60°附近,这一角度下可以最大限度地减少海面风浪对探测结果的影响。

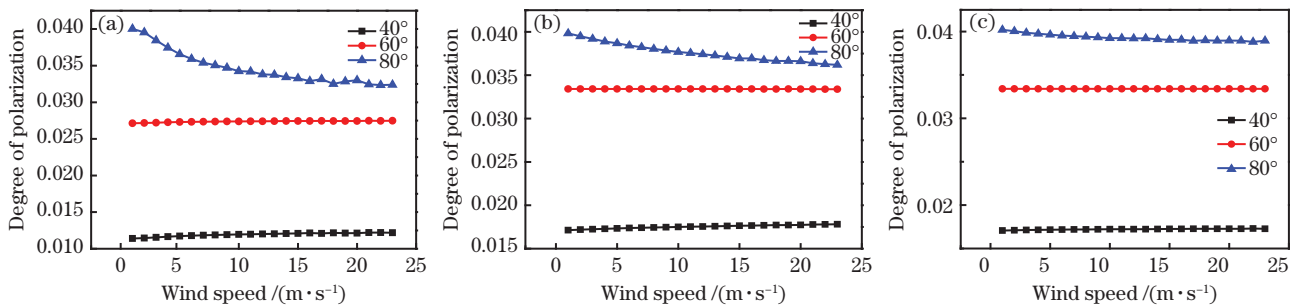


图 10 不同探测角下偏振度与风速关系。(a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

Fig. 10 Degree of polarization versus wind speeds with different detecting angles.

(a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

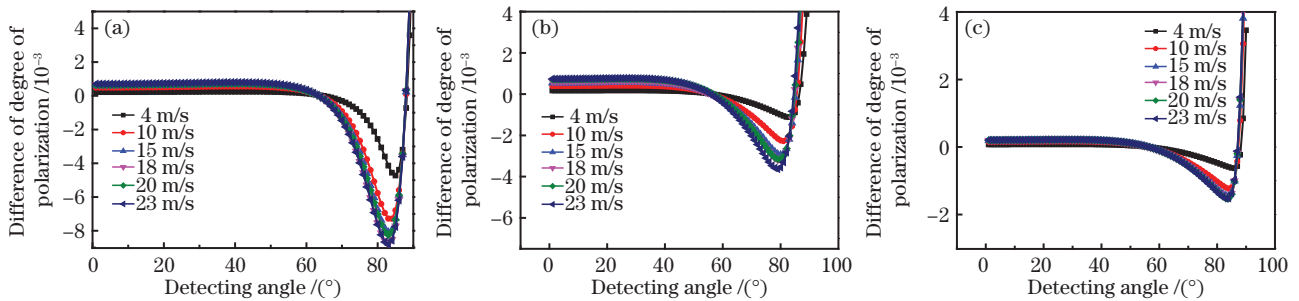


图 11 偏振度差值与探测角关系。(a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

Fig. 11 Difference of degree of polarization versus detecting angle. (a) PM; (b) Elfouhaily; (c) Jonswap

6 结 论

分别利用三种海浪谱和快速傅里叶变换模拟了海面,综合考虑了海面场景下红外发射和反射偏振效应,根据双向反射分布函数的微面元模型,结合菲涅耳反射定律和基尔霍夫定律给出了偏振度计算模型,最后利用 RadTherm 进行了仿真。仿真结果表明:海面长波红外偏振特性昼夜变化较大,PM 谱在探测角为 80° 时,海面平均偏振度取得最大值,Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱在探测角为 70° 时,海面平均偏振度取得最大值。由于 Jonswap 谱和 Elfouhaily 各微面元入射角分布相对集中,其平均偏振度高于 PM 谱,随着风速的增加,各面元入射角的分布几乎对称地向两侧拓展,故在较小探测角时,偏振度随风速增加而增加,而在大探测角时,偏振度随风速增加而减小。对于 PM 谱探测角为 63° 时,海面偏振度基本不受风速影响,而 Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱在探测角为 56° 时,海面平均偏振度受风速的影响最小。可以看到海面建模仿真时,选择不同的海浪谱对海面偏振特性具有一定的影响,因此对于充分开发的深水海面应选择 PM 谱进行仿真研究,而未充分开发的深水海面应选择 Jonswap 谱或 Elfouhaily 谱以确保仿真结果的可靠性。

参 考 文 献

- [1] Wang X, Xia R Q, Jin W Q, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182.
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [2] Wang Z, Hong J, Ye S, et al. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1500-1503.
汪震, 洪津, 叶松, 等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究 [J]. *光子学报*, 2007, 36(8): 1500-1503.
- [3] Xie C, Wang F. Research on infrared polarization radiation properties experiment of camouflage coating [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 890-894.
谢琛, 王峰. 伪装涂层红外偏振辐射特性实验研究 [J]. *红外技术*, 2015, 37(10): 890-894.
- [4] Xun L N, Xue M G, Zeng X F, et al. Research of infrared polarization characteristics of aircraft materials and its camouflage coating [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(9): 783-787.
寻丽娜, 薛模根, 曾献芳, 等. 飞机材料及其伪装涂层的热红外偏振特性研究 [J]. *红外技术*, 2016, 38

- (9): 783-787.
- [5] Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1511001.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1511001.
- [6] Cui W Y, Huang W J, Yi W N. Calibration and preprocessing method for amplitude divided simultaneous imaging polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2011002.
崔文煜, 黄文娟, 易维宁. 分束型同时偏振成像系统定标及预处理方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2011002.
- [7] Yu D M, Duan W B, Li D Q, et al. Design and fabrication of polarization- and phase-modulated mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1531001.
余德明, 段微波, 李大琪, 等. 偏振和相位调控反射镜的设计与制备 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1531001.
- [8] Wang X, Liang J A, Long H B, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704002.
王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0704002.
- [9] Zhang C, Wu X, Xie J. Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function [J]. *Optics and 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.
- [10] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1981, 15(3): 307-316.
- [11] Ma X L. Research on infrared radiation characteristics and scene simulation of typical sea surface [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
马小莉. 典型海面红外辐射特性及场景仿真研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [12] Su X. Electromagnetic modeling and measurement of scattering from multi-scale sea surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
苏翔. 多尺度海面电磁散射特性建模与测量研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [13] Wu G K. Study of the electromagnetic scattering from two-dimensional rough sea surface based on improved Wen's spectrum [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
吴庚坤. 基于文氏改进谱的二维随机粗糙海面建模及其电磁散射计算的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [14] Zhang Y D, Wu Z S. Light scattering and imaging of two-dimensional rough sea surface in the infrared [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1039-1043.
张延冬, 吴振森. 二维粗糙海面的光散射及其红外成像 [J]. *光学学报*, 2002, 22(9): 1039-1043.
- [15] Hou X L, Shen P Z, Wang W Y. Method of ocean wave synthesis based on directional spectrum [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 130-134.
侯学隆, 沈培志, 王文辉. 基于方向谱的海浪合成方法 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(1): 130-134.
- [16] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z 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.
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.
- [17] Shen D L, Zhao M, Kang Y L, et al. Thermal simulation and analysis of ground target based on Radtherm [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2015(1): 84-87.
沈敦亮, 赵民, 康永来, 等. 基于 Radtherm 的地面目标红外热分析 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2015(1): 84-87.
- [18] Lü Y F. The study of the polarized characteristics of water [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
吕云峰. 水体的偏振特性研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2012.