

海面背景下舰船目标红外辐射特性分析

陈彬, 王成安, 王富强, 谭建宇

(哈尔滨工业大学(威海) 汽车工程学院, 威海, 264209)

(联系电话: 0631-5687782, E-mail: tanjianyu@hitwh.edu.cn)

摘要: 随着红外探测技术的广泛应用, 研究舰船目标及其海面背景的辐射特性对于提高目标识别有越来越重要的军事意义。本文首先计算了舰船表面的温度分布, 通过坐标变换、面元求和以及波长积分等操作计算并分析了舰船在不同时刻、不同探测方向、不同波段的辐射特性; 然后考虑太阳、天空的影响, 使用 Cox-Munk 模型和 Monte Carlo 方法计算了海面的粗糙程度, 并将不同探测角度的海面辐射亮度计算值与实测数据比较, 误差均小于 15%; 最后根据红外探测光学原理及辐射理论, 模拟了 8-12 μm 波段舰船在海面背景下不同探测角度的红外热像, 得出该舰船目标的最佳探测天顶角为 15 度。

关键词: 海面目标; 辐射特性; 粗糙海面; 红外热像

1 引言

近年来, 中国周边海域局势越来越复杂, 增强军事力量是维护国家利益的强大后盾。研究海面背景下舰船的红外信号特征, 可以直观定性地分析目标与背景的对比特征, 判别舰船目标识别的特征部位, 对于实际军事有强烈的需求和应用背景。

国外对有关方面的研究开展较早, 1999 年加拿大的 DAVIS 工程公司(W R Davis Eng. Ltd) 发布了与美国 NRL(National Research Lab)一起开发的功能强大的舰船红外特征管理软件[1]。2013 年, 美国的 Gray 等人通过神经网络法模拟了舰船跟踪识别系统, 能够有效排除红外诱饵弹对舰船目标的干扰[2]。国内相关研究起步较晚, 2007 年, 任海霞等利用实时海面舰船红外热像仿真平台模拟了不同天气状况、不同观测视角的舰船红外热像[3]。2014 年, 姜笛等提出了一种高效的舰船红外特性建模方法, 得到了比传统方法精度更高的红外仿真图像[4]。

本文重点考虑不同因素对舰船辐射特性的影响。计算了考虑环境影响的某型号导弹驱逐舰的温度分布, 通过编程计算并分析了舰船不同时刻、不同波段、不同方向的辐射特性。使用 Cox-Munk 模型和 Monte Carlo 方法计算了海面的粗糙程度, 结合双向反射分布函数计算了海面辐射亮度, 并将计算值与实测数据比较。模拟了 8-12 μm 波段海面背景下不同探测角度的舰船红外热像。

2 舰船目标及海面背景辐射特性分析

2.1 舰船目标辐射特性分析

通过适当简化得到舰船的几何模型如图 1 所示。对舰船进行网格划分,每个网格面元需要考虑导热、对流和辐射三种换热形式。其中导热形式较为简单,可以用单元面与周围相邻面元的导热方程进行计算;对流包括两部分,当舰船表面与空气接触时,对流换热的经验公式参考文献[5],当舰船表面与海水接触时,采用外掠等温平板的对流换热关联式;辐射包括两部分,太阳辐射利用太阳加载模型进行计算,舰船动力舱与船体表面的辐射换热利用 Surface to Surface 模型进行计算。

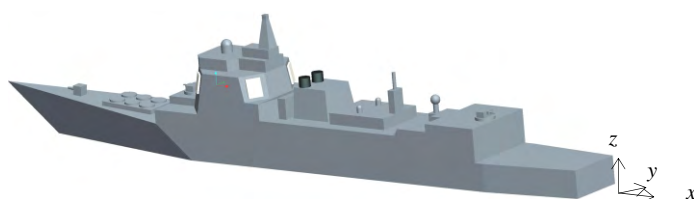


图 1. 舰船几何模型

在计算舰船表面温度分布的基础上分析目标的辐射特性。舰船目标的辐射包括自身的漫发射和太阳、天空对目标的反射两部分。定义探测方向与目标 Z 轴正向夹角为 θ , 探测方向与 X 轴正向的夹角为 φ 。本文通过编程实现坐标变换、面元辐射强度求和以及波长积分等操作,分别计算了 3-5 μm 和 8-12 μm 波段舰船不同时刻、不同方位角的辐射强度(探测天顶角都为 30°)。如图 2 和图 3 可以得到以下结论:

- (1) 在 3-5 μm 波段的三个时刻中,12:00 时舰船辐射强度最大,是 8:00 时辐射强度的 1.14 倍,这是由于中午太阳辐射强度大,舰船表面温度升高使得舰船辐射强度增大。
- (2) 不同波段辐射强度周向分布趋于一致,但 8-12 μm 波段的辐射强度是 3-5 μm 波段的 15 倍,因此 8-12 μm 波段比 3-5 μm 更利于舰船的识别。

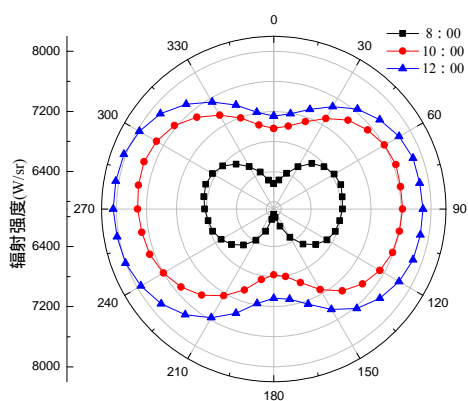


图 2. 舰船 3-5 μm 辐射强度分布图

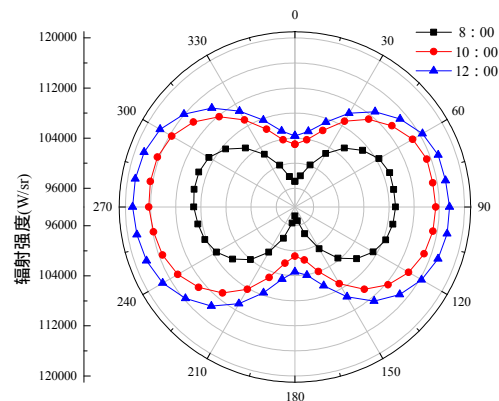


图 3. 舰船 8-12 μm 辐射强度分布图

2.2 海面辐射特性分析

2.2.1 海面粗糙程度计算

海面粗糙程度可以用海面双向反射分布函数(BRDF)表示。BRDF 的表达式为[6]：

$$f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, E_i) = \frac{dL_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, E_i)}{dE_i(\lambda, \theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式(1)表示沿 (θ_s, φ_s) 方向的散射亮度 dL_r ($W / (m^2 \cdot sr)$) 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射的辐照度 dE_i (W/m^2) 之比，其几何示意图如图 4 所示。

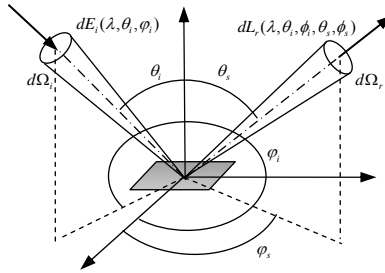


图 4. BRDF 几何示意图

粗糙海面可看成由许多小波面构成，可认为光线在小波面的反射遵循 Fresnel 定律。设 θ_n 和 φ_n 分别为海面小波面法向量的天顶角和方位角。各项异性海面坡度分量概率分布模型为[7]：

$$P(\theta_n) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \tan^2 \theta_n\right); \quad \sigma^2 = 0.003 + 0.00512U \quad (2)$$

其中, σ^2 为 Cox-Munk 海谱模型中小波面的斜坡方差，该公式是风速 U 的函数。由(2)式可得：

$$\tan \theta_n = \sigma \sqrt{-2 \ln(q)}; \quad \phi_n = 2\pi q_1 \quad (3)$$

其中, $q = 1 - P(\theta_n)$ 和 q_1 为 $[0,1]$ 的随机数。由式(3)可确定小波面法向方向的坐标 (z_x, z_y, z_z) 为：

$$z_x = \frac{dz}{dx} = \tan \theta_n \cos \phi_n; \quad z_y = \frac{dz}{dy} = \tan \theta_n \sin \phi_n; \quad z_z = \frac{dz}{dz} = 1 \quad (4)$$

本文使用 Monte Carlo 方法编写程序计算海面 BRDF，利用随机射线来模拟能量离散量。利用 Fresnel 定律计算小波面反射率，判断光线是否被吸收，如果该光线被吸收，则跟踪结束；如果该光线被反射，则继续跟踪直至被探测器吸收。

2.2.2 海面辐射特性分析

海面红外辐射由海面本身的红外辐射和对环境辐射的反射组成。海面辐亮度可表示为：

$$L_{sea} = \varepsilon_g L_b(T_{sea}) + f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \cos \theta_i [E_{sky}(\lambda, \theta_i, \varphi_i) + E_{sun}(\lambda, \theta_i, \varphi_i)] \quad (5)$$

其中, T_{sea} 为海面温度, ε_g 为海面的定向发射率, 其公式参考文献[8], $E_{sky}(\lambda, \theta_i, \varphi_i)$ 和 $E_{sun}(\lambda, \theta_i, \varphi_i)$ 分别为沿着 (θ_i, φ_i) 方向入射到海面的天空辐照度和太阳辐射照度。

表 1 的计算条件为：中纬度夏季，上午 11:30，太阳方位角 $\varphi_i=270^\circ$ ，天顶角 $\theta_i=15^\circ$ ，天气晴朗，海水平均温度 $T=12^\circ\text{C}$ ，太阳辐照度为 $19.10\text{W}/\text{m}^2$ ，天空辐照度为 $0.73\text{W}/\text{m}^2$ ，风速为 $6\text{m}/\text{s}$ ，探测器天顶角分别为 1° 和 3° 。比较可得，海面辐射亮度计算值与实测数据[9]误差不超过 15%，计算结果可信。

表 1 海面辐射计算结果与实测数据比较

辐射亮度 $W / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	3-5 μm		8-14 μm	
	1°	3°	1°	3°
计算值	1.360	1.398	41.60	41.95
实测值	1.217	1.257	36.47	37.94
误差	11.7%	11.2%	14%	10.5%

3 海面背景下舰船目标红外热像仿真

模拟舰船红外热像首先要计算出探测器上每个像素的辐射亮度平均值。目标和背景的表面可以看成是由许多小面元构成的。根据光学原理，探测器上每个像素所覆盖的面元个数为 $n = N_h \times N_v$ 个， N_h 和 N_v 分别为垂直探测器视线平面内水平方向和垂直方向所覆盖的小面元数量。对每个小面元的辐射强度进行叠加求和，再除以 n 个小面元在探测方向上的投影面积，则可得该像素的辐射亮度平均值。

根据 2.2.2 节的计算条件，模拟探测器天顶角分别为 0° 、 5° 、 10° 、 13° 、 15° 、 18° 、 25° 和 30° 时海面的红外热像。其中，探测器天顶角为 15° 时， $200\text{m} \times 160\text{m}$ 海域的红外热像如图 5 所示。海面辐射亮度平均值随探测天顶角的变化如图 6 所示。可以看出：

- (1) 海面红外热像呈现随机性，明暗相间。
- (2) 海面平均辐射亮度在太阳辐射高反射区取最大值，为最小值的 1.2 倍。

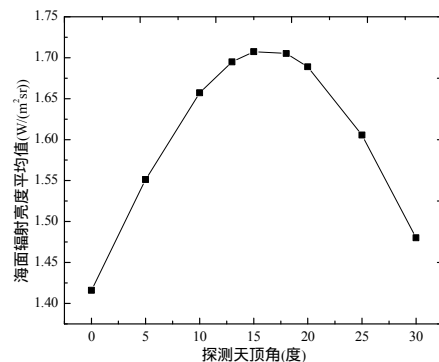
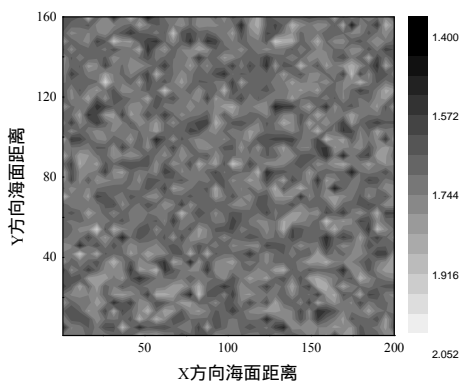


图 5. 15° 探测天顶角海面红外热像(单位: $W / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$) 图 6. 海面辐射亮度平均值随探测天顶角的变化

如图 7，计算了舰船在海面背景下随探测天顶角变化的红外热像。计算条件为：8-12 μm 波段，上午 11:30，天气晴朗，舰船全速前进，探测器距离目标 5km，探测方位角 $\varphi_i=180^\circ$ 。

由于探测的方位不同，每个面元对探测器贡献的辐射亮度也不同，使得不同探测方向的辐射亮度存在差异，将各角度的辐射亮度最高值进行比较，当 $\theta_i=15^\circ$ 时辐射亮度最大，为 $198.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ，因此15度为该舰船最佳探测角度。

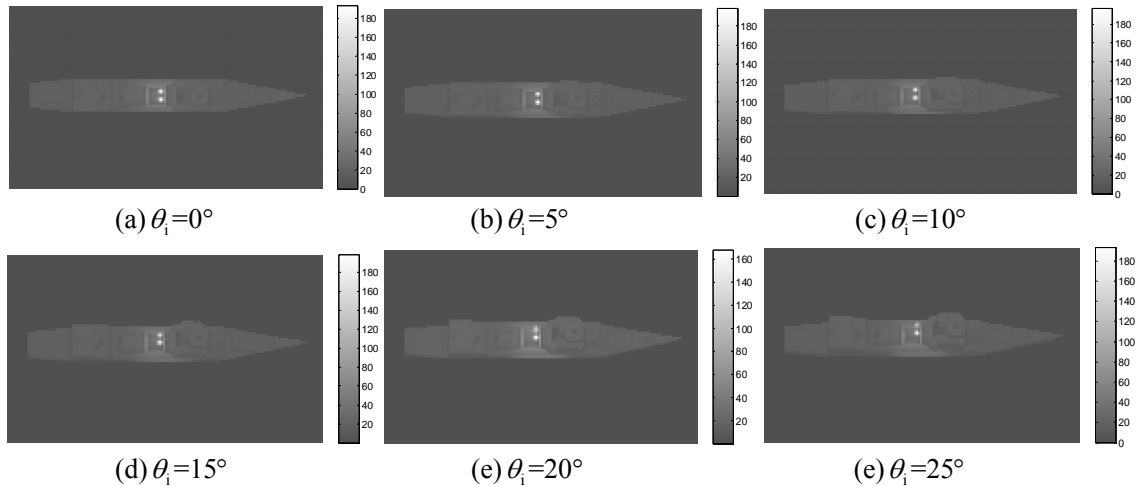


图 7. 海面背景下不同探测天顶的舰船红外热像(单位： $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$)

4 结论

本文首先研究了舰船在不同时刻、不同方位、不同波段的辐射特性，其次计算了海面在不同波段的辐射亮度并与实测值进行比较，最后模拟了海面背景下舰船不同探测角度的红外热像。得到以下结论：

- (1) 舰船在同一时刻不同方位角上的辐射强度存在差异，在 $3\text{-}5 \mu\text{m}$ 波段的三个时刻中，12:00时舰船辐射强度最大，是8:00时舰船辐射强度的1.14倍。不同波段辐射强度周向分布趋于一致，区别主要体现在数值上， $8\text{-}12 \mu\text{m}$ 波段舰船的辐射强度是 $3\text{-}5 \mu\text{m}$ 波段的15倍。
- (2) 不同探测角度的海面辐射亮度计算值与实测数据误差不超过15%，计算结果可信。
- (3) 海面红外热像呈现随机性，明暗相间。海面平均辐射亮度在太阳辐射高反射区取最大值。该舰船在不同探测角度条件下的红外热像存在差异，最佳探测角度为15度。

参 考 文 献

- 1 Vaitekunas D A, Fraedrich D S. Validation of the NATO-standard ship signature model (SHIPIR). International Society for Optics and Photonics, 1999: 103-113.
- 2 Gray G J, Aouf N, Richardson M, et al. Countermeasure effectiveness against an intelligent imaging infrared anti-ship missile. Optical Engineering, 2013, 52(2): 026401-026401.
- 3 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.

- 4 姜笛, 张科, 吕梅柏. 一种高效的舰船红外辐射特性建模方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 94-98.
- 5 Gonda T, Gerhart G R. A comprehensive methodology for thermal signature simulation of targets and backgrounds. International Society for Optics and Photonics, 1989: 23-27.
- 6 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 非朗伯面目标对复杂背景红外辐射的散射特性[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 800-804.
- 7 Leathers R A, Downes T V, Davis C O, et al. Monte Carlo radiative transfer simulations for ocean optics: a practical guide. Naval Research Lab Washington DC Applied Optics Branch, 2004.
- 8 Wilf I, Manor Y. Simulation of sea surface images in the infrared. Applied optics, 1984, 23(18): 3174-3780.
- 9 刘云飞, 王福恒. 红外海天背景辐射亮度的理论计算[J]. 系统工程与电子技术, 1990, 1: 28-35.

Analysis of Infrared Radiation Characteristics of Ship under sea background

Bin Chen, Chengan Wang, Fuqiang Wang, Jianyu Tan

(School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, 264209)

Abstract: With the wide application of infrared detection technology, it has more important military significance to research the radiation characteristics of the ship and sea background for improving target recognition. This paper calculated the surface temperature distribution of the ship on the first. Moreover, we calculated and analyzed radiation characteristics of ship in different time, different detection direction and different band, via operation of coordinate transformation, the surface element summation and wavelength integration. And then, consider of the influence of the sun and sky, we calculated the sea radiation characteristics in different detection direction, using Monte Carlo method and Cox-Munk model. The error of calculated and measured data is less than 15%. Finally, according to the infrared detection optical principles and radiation theory, we simulated the infrared image of ship in different detection direction under background of sea. The results show that the best detection zenith angle of ship target is 15 degrees.

Keywords: Ship target; Radiation characteristics; Imaging infrared; Rough sea