

海面舰船的长波红外热像仿真

石兴亮 孟庆杰 王成安

Infrared thermography simulation of long-wave for ships on sea surface

SHI Xingliang, MENG Qingjie, WANG Chengan

引用本文:

石兴亮, 孟庆杰, 王成安. 海面舰船的长波红外热像仿真[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 877–885. DOI: 10.5768/JAO202546.0404001

SHI Xingliang, MENG Qingjie, WANG Chengan. Infrared thermography simulation of long-wave for ships on sea surface[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 877–885. DOI: 10.5768/JAO202546.0404001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0404001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

舰船尾迹和海面红外仿真成像

Infrared simulation imaging of ship wakes and sea surface

应用光学. 2023, 44(2): 286–294 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201007>

锁相热像方法实验测量Nb₂O₅薄膜吸收率

Absorptance measurement on Nb₂O₅ coating with lock-in thermography method

应用光学. 2020, 41(3): 441–446 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301002>

一种改进的微光夜视系统视距探测方程

Improved apparent distance detection model of low-level-lightnight vision system

应用光学. 2023, 44(4): 887–897 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0406002>

基于水幕的舰船红外干扰策略研究

Research on ship infrared jamming strategy based on water curtain

应用光学. 2021, 42(3): 404–412 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301005>

改进YOLOX-S的红外舰船目标检测算法

Infrared ship target detection algorithm based on improved YOLOX-S

应用光学. 2023, 44(5): 1054–1060 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0502006>

透射式能见度仪校准装置的研制及测量结果分析

Development of transmission visibility meter calibration device and analysis of measurement results

应用光学. 2023, 44(6): 1355–1361 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0605001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0877-09

引用格式: 石兴亮, 孟庆杰, 王成安. 海面舰船的长波红外热像仿真 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 877-885.

SHI Xingliang, MENG Qingjie, WANG Chengan. Infrared thermography simulation of long-wave for ships on sea surface[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 877-885.



在线阅读

海面舰船的长波红外热像仿真

石兴亮¹, 孟庆杰², 王成安¹

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 新能源学院, 山东 威海 264209; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 基于舰船和海面的红外辐射差异, 可利用红外探测器识别目标舰船。将采用 CFD 软件获取的舰船表面温度场与 Blender 软件建立的粗糙背景海面场进行耦合, 并使用 Modtran 大气软件计算其在海洋大气环境中的透过率, 基于逆向蒙特卡洛法编写热像算法, 获取不同探测条件下 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的红外热像。结果表明: 热像中舰船的红外特征主要集中在烟囱和动力舱部位, 是识别目标的主要位置; 随着探测高度的增加, 识别舰船红外特征的难度增加, 通过调整相机焦距可捕捉到详细的目标特征。

关键词: 目标舰船; 红外热像; 逆向蒙特卡洛法; 大气透过率

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0404001

Infrared thermography simulation of long-wave for ships on sea surface

SHI Xingliang¹, MENG Qingjie², WANG Chengan¹

(1. School of New Energy, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: On the basis of the infrared radiation difference between ships and the sea surface, it is possible to use infrared detectors to identify target ships. The surface temperature field of the ships obtained by CFD software and the rough background sea surface field established by Blender software were used, and the transmittance in the oceanic atmospheric environment was calculated using the Modtran atmospheric software. Based on reverse Monte Carlo method, a thermal imaging algorithm was developed to obtain the $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ infrared thermal images under different detection conditions. The results show that the infrared features of the ships in the thermal image are mainly concentrated in the chimney and power plant compartment, which is the main location for identifying the target. As the detection height increases, the difficulty of identifying the infrared features of the ships increases, and the detailed target features can be captured by adjusting the camera focal length.

Key words: target ships; infrared thermography; reverse Monte Carlo method; atmospheric transmittance

引言

军舰作为海上作战的重要力量, 及时掌握其位置、动向等相关信息是影响战局的重要因素,

建立全方位的侦察、识别体系对维护国家海洋权益有着极其重要的军事意义。随着红外技术的快速发展与应用, 其具有作用距离远、可识别伪

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52071122)

作者简介: 石兴亮 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事海面红外热像探测技术研究。E-mail: 13455175012@163.com

通信作者: 王成安 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下目标红外探测技术研究。E-mail: chengan.wang@hitwh.edu.cn

装、抗干扰能力强、全天候工作等优点,目前红外探测设备的最高分辨率可达 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],其在军事领域探测目标的作用越来越受到重视,可与雷达等其他探测方式进行互补,进一步提高探测目标的准确性。

海洋中的目标舰船由于温度和红外发射率的不同,导致海面与舰船的红外信号存在差异,因此可在热像中获取目标舰船的红外特征。目前对舰船的红外特性开展的相关研究主要集中在舰船的温度场分布,通过采用数值模拟的方法获得表面温度场分布^[2-5],经分析得出舰船的表面热源主要集中在烟囱壁面和动力舱位置。对于海面的红外辐射特性,主要集中在研究海面发射率对红外辐射的影响,通过分析海面风速、风向等因素建立了相关模型,并计算了其发射率和反射率^[6-7]。针对海面粗糙度对发射率的影响,LEESM 等人通过分析海面小、大尺度粗糙度间的相互作用,提出了一种新的海面发射率计算模型,进一步完善了海面红外发射率计算模型^[8]。

机载/星载红外探测设备接收的海面舰船的复合红外信号在大气传输过程中,由于大气组分的吸收、散射等作用而造成一定的衰减,学者们通过研究大气成分建立了辐射衰减计算模型^[9-10],并利用实验设备和 Modtran 大气计算软件,计算了不同大气环境中红外辐射的透过率^[11-12]。对于海面背景下目标舰船红外热成像的研究,学者们使用不同的仿真软件和算法建立了相关红外热像模型^[13-16],而这些研究或没有考虑大气的影,或其算法模型计算量较繁重。杨利红等人^[17]通过分析舰船所处的复杂环境,获取了不同时刻太阳辐射环境下的舰船红外辐射模型。黄子亮等人^[18]在研究中考虑到了红外信号在大气传输过程中的衰减影响,建立了舰船尾迹的红外热像。

针对海面军舰目标等作战单元的探测识别,本文在前人研究的基础上,综合考虑海洋大气环境对海面舰船复合红外信号的影响,开展了基于逆向蒙特卡罗射线追踪法的海面背景目标舰船红外热像的仿真研究。通过模拟不同探测条件下海面舰船目标的红外热像,为海面舰船的红外探测预警及隐身提供理论依据。

1 红外辐射传输模型

粗糙海面中目标舰船的红外探测示意图如图1

所示。红外相机接收的辐射能量包含目标舰船自身辐射、背景海面辐射、背景海面与舰船目标反射的海面天空背景辐射与太阳辐射。

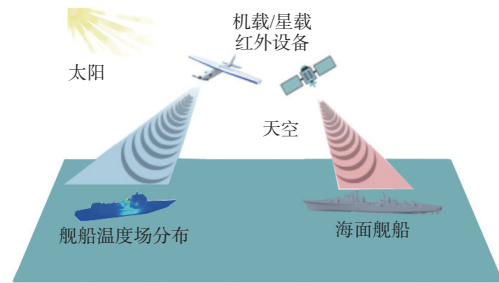


图1 红外辐射探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared radiation detection

红外探测器接收的辐射能量的表达式如式(1)所示:

$$q_{\text{detector}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \tau(\lambda)[q_{\text{sea}}(\lambda) + q_{\text{ship}}(\lambda) + q_{\text{sun}}(\lambda) + q_{\text{sky}}(\lambda)] \quad (1)$$

式中: $q_{\text{detector}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s)$ 为红外相机接收的总辐射能量; θ_i 为入射光线的天顶角; φ_i 为入射光线的方位角; θ_s 为探测器到目标面元天顶角; φ_s 为探测器到目标面元方位角; λ 为光线波长; τ 为目标面到探测器的大气穿透率; q_{sea} 为海面自身辐射能量; q_{ship} 为舰船自身辐射能量; q_{sky} 为海面及舰船目标反射的天空辐射能量; q_{sun} 为海面及舰船目标反射的太阳辐射能量。

背景海面和舰船目标的红外辐射能量 q_{sea} 、 q_{ship} 的计算公式如下:

$$q_{\text{sea}}(\lambda) = q_{\text{ship}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot E_{\text{bj}} \quad (2)$$

式中: E_{bj} 为所测波段的自身辐射能量; $\varepsilon(\lambda)$ 为 λ 波段的发射率。

目标舰船与海面反射的太阳的辐射能量的计算公式如下:

$$q_{\text{sun}} = \rho_{\text{sun}} \cdot E_{\text{sun}} \quad (3)$$

式中: ρ_{sun} 为目标舰船及海面对太阳辐射的反射率; E_{sun} 为入射到海面的太阳辐照度,单位为 W/m^2 。

背景海面和舰船目标反射的天空背景辐射能量的经验表达式^[19]如下:

$$N_{\text{sky}} = \sigma T_{\text{air}}^4 \cdot (B_k + C_k \sqrt{E_{\text{air}}}) \quad (4)$$

$$E_{\text{air}} = R_h \times 6.018 \times \exp\left(\frac{17.269 \times (T_{\text{air}} - T_0)}{T_{\text{air}} - 35.86}\right) \quad (5)$$

式中: E_{air} 为近地水蒸气压,单位 hPa ; R_h 为近地面大气相对湿度; T_{air} 为天空背景环境温度,单位 K ; $B_k=0.61$; $C_k=0.005$ 。

特定波段天空辐射能量表达式为

$$E_{\text{sky}} = \frac{\eta_{(\lambda_1-\lambda_2)} \cdot N_{\text{sky}}}{\pi} \quad (6)$$

式中 $\eta_{(\lambda_1-\lambda_2)}$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内能量与总能量的比值。

红外探测器接收到目标舰船与海面反射的天空背景辐射亮度为

$$L_{\text{sky}} = \rho_{\text{sky}} \cdot E_{\text{sky}} \quad (7)$$

对于海面发射率, 根据 Fresnel 定律, 垂直方向的极化分量为 $\rho_{\perp}$, 水平方向的极化分量为 $\rho_{\parallel}$, 两者满足以下关系式:

$$\rho_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (8)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (9)$$

式中: θ_1 为入射角; θ_2 为折射角; n_1 为大气的折射率, 通常取 1; n_2 为海水的折射率, 与波段 λ 有关。

由 Snell 定律可得入射角和折射角的关系为

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1 \right) \quad (10)$$

海面反射率 ρ 为

$$\rho(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} (\rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2) \quad (11)$$

根据基尔霍夫定律, 可得海面红外辐射发射率 ε 为

$$\varepsilon(\theta_1, \theta_2) = 1 - \rho(\theta_1, \theta_2) \quad (12)$$

舰船与海面的复合红外辐射信号穿过大气环境进入红外探测器设备时, 大气成分会对红外辐射产生衰减效应。在大气分子的吸收作用下, 红外辐射的透过率可表示为

$$\tau = \tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \tau_{\text{CO}_2} \quad (13)$$

式中: $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气的透过率; τ_{CO_2} 为二氧化碳的透过率。

关于大气成分对红外辐射的散射作用, 由比尔-朗伯定律可知, 辐射透过率与散射系数之间的关系^[20]可表示为

$$\mu_s(\lambda) = \mu_m(\lambda) + \mu_p(\lambda) \quad (14)$$

$$\tau(\lambda, x) = \exp[-\mu_s(\lambda) \cdot x] \quad (15)$$

式中: $\mu_m(\lambda)$ 为气体分子散射系数; $\mu_p(\lambda)$ 为气溶胶微粒散射系数; $\mu_s(\lambda)$ 为散射系数; x 为路径距离长度。

2 海面舰船红外仿真模型

2.1 舰船目标温度分布

舰船行进过程中内燃机产生的能量除对舰船

提供动力外, 还存在大量的热量损失, 损失的热量导致舰船的动力装置部位以及烟囱装置等位置的温度场异于其他位置。通过合理简化舰船目标, 建立的几何模型如图 2(a) 所示。综合考虑舰船运行过程中舰船内部热源传递、与环境对流换热等因素的影响, 进而建立整体舰船热力学平衡模型。假定舰船不同部位的材质是由同一种合金材料构成, 最终基于 CFD 仿真软件获取舰船表面的温度场分布。

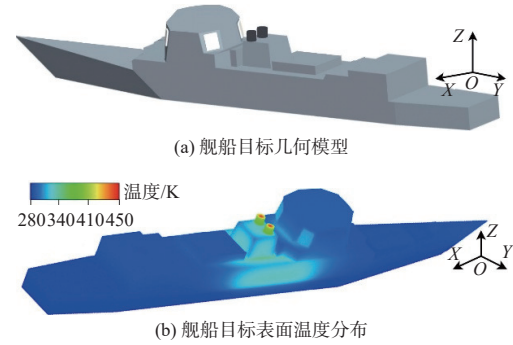


图 2 舰船目标表面温度仿真

Fig. 2 Surface temperature simulation of ship targets

舰船内部的内燃机装置是整个系统热量的主要来源。由于舰船内部传热、散热以及回热装置均为十分复杂的装置, 为了提高仿真的计算效率, 在舰船热力学平衡仿真模型中, 将舰船内部散热过程简化为一个稳定的热源装置, 并忽略舰船系统中热回收系统以及其他装置产生的热量。设定舰船内燃机的最大运行功率为 18 000 kW, 根据舰船内燃机的热平衡公式^[21], 可以得出动力舱位置的散热量以及排气系统的散热量。最终获取的舰船目标表面的温度场分布如图 2(b) 所示。从舰船目标温度场仿真结果可以看出, 舰船的烟囱壁面处的温度值最高, 最高温差可达 170 K, 此外动力舱位置的红外辐射热源也相对较高。

此外, 由于舰船不同部位所使用的材料涂层存在差异, 导致目标舰船表面发射率并不是单一的, 而对于不同涂层的参数鲜有资料公开。本文查阅相关材料参数, 设置舰船表面发射率为常数, 取值为 0.8。

2.2 红外辐射

对于红外仿真模型中涉及的背景红外辐射和红外辐射大气透过率, 本文利用 Modtran 大气计算软件计算获取。计算条件如下: 中纬度海洋环境大气下 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 波段海面信号的红外辐射透

过率,探测高度分别为 3 km、5 km、10 km,相同探测高度下的探测天顶角分别为 0°、10°、30°。

2.2.1 大气透过率

使用 Modtran 大气计算软件计算中纬度海洋环境大气中 8 μm ~12 μm 波段的红外辐射透过率,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出:在相同探测天顶角下,随着探测高度的增加,海洋环境下红外辐射大气透过率逐渐降低;在相同探测高度下,随着探测天顶角的增加,红外辐射的透过率逐渐降低。

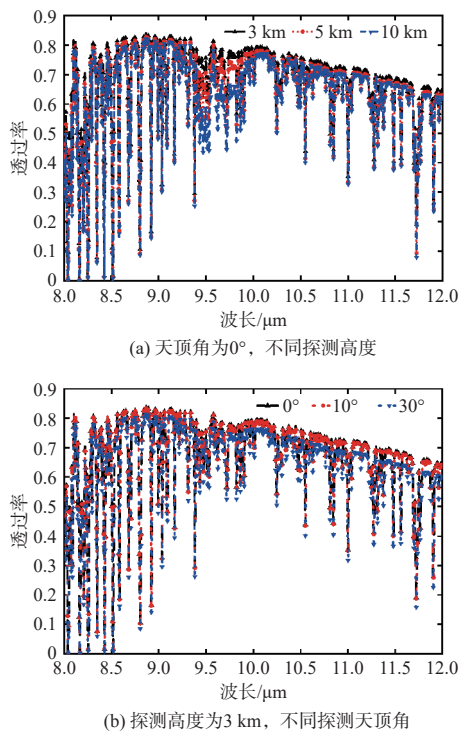


图 3 红外辐射的大气透过率

Fig. 3 Infrared radiation atmospheric transmittance

2.2.2 海面背景辐射与太阳辐射

利用 Modtran 大气计算软件计算了海面及舰船目标反射的海面天空背景辐射及海面太阳辐射,计算结果如图 4 所示。

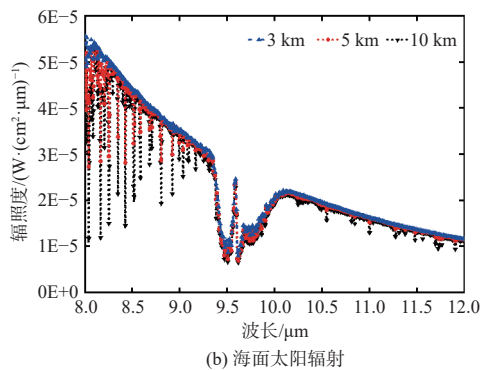
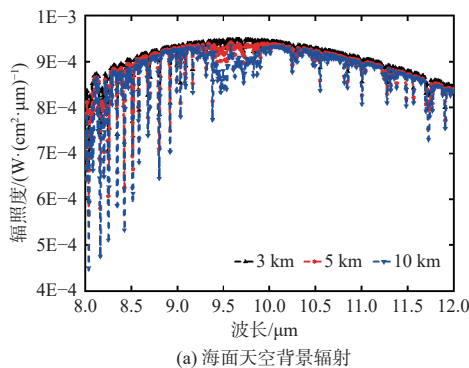


图 4 红外辐射大气透过率

Fig. 4 Infrared radiation atmospheric transmittance

2.3 海面模型

背景海面的红外辐射强度由其粗糙度和海面温度决定。利用 Blender 软件模拟粗糙背景海面,结果如图 5(a) 所示,图 5(b) 展示的海面是由数量足够多的三角形面元结构组成。模拟获取的粗糙海面中海浪高度的最大值为 0.3 m,背景海面的温度值与舰船表面温度场仿真获取的背景场温度值相同,均为 280 K。

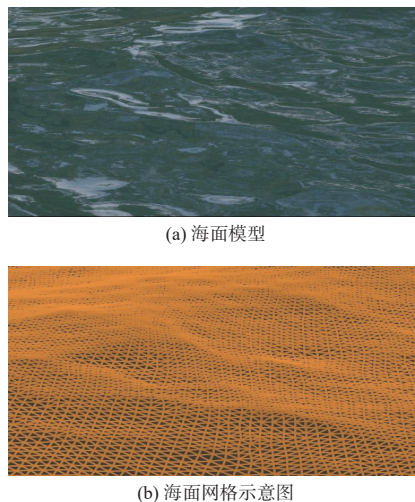


图 5 粗糙海面

Fig. 5 Rough sea surface

2.4 红外热像仿真模型

由于舰船目标与海面向天空发射的红外信号存在差异,当机载/星载红外探测设备捕捉到这些透过大气的红外信号时,红外探测设备通过对这些红外信号进行转换,以获取红外热像,进而根据舰船的红外特征实现对目标的识别。

2.4.1 逆向蒙特卡洛法的基本思想

本文基于逆向蒙特卡洛射线追踪法建立了海面背景下舰船目标的红外仿真计算模型。该方法

将红外辐射传输的确定性问题转化为随机性问题, 将热辐射传输中复杂的吸收、发射、反射、折射等过程分解为一系列独立的子过程, 并建立每个子过程的概率模型, 通过概率统计方法判断光线到达的最终落点, 并利用热力学等相关知识获取该落点的辐射能量值。基于逆向蒙特卡洛射线追踪法的计算模型在红外仿真过程中大大减少了计算过程中所需要发射的光线数量, 使其具有更高的计算效率。基于红外探测实现原理, 在红外仿真模型中, 将红外相机简化为由一个相机焦点和一个相机平面组成, 其中相机平面尺寸是一个 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的矩形平面, 该平面由 512×512 像素组成, 且从相机焦点到相机平面的焦距是可以调节的。仿真过程中将相机的焦点作为每条光束的发射起始点, 相机焦点与相机平面的像素点决定了每条光束的发射方向, 其中每个像素点穿过 100 条光线。

在不同的红外仿真工况中, 由红外相机焦点发射出数量足够多的光线, 根据探测器相关信息确定每条光线的发射方向, 对光线进行逆向追踪。利用每条光线与落点面元的相关信息计算该面元处的红外辐射发射率, 并将程序函数产生的随机数与发射率进行比较, 确定该光线是被面元吸收或反射。对反射的光线继续追踪, 直到追踪到最终被吸收的位置。利用相对性原理计算到达特定落点的红外辐射能量。通过追踪、统计每条光线的结果, 利用热辐射传递过程中相关概念进行分析计算, 得出辐射能量的统计结果。基于逆向蒙特卡洛射线追踪的过程如图 6 所示。图 6 中由红外设备发出数量足够多的光束, 对每条光束逆向追踪, 确定光线的落点。确定光线落点后, 再对光束进行正向追踪, 最终由红外设备获取目标的红外热像。

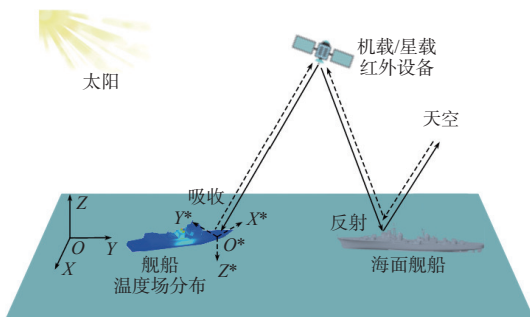


图 6 逆向蒙特卡洛射线追踪法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of RMC ray tracing method

在逆向追踪射线光束时, 当光线在交点面元被反射时, 需要确定光线的反射方向, 将光线交点面元的局域坐标 $X^*Y^*Z^*$ 转化为全局坐标 XYZ , 局域坐标系下光线向量的坐标为 (x^*, y^*, z^*) , 全局坐标系下光线向量的坐标为 (x, y, z) 。将面元的法向量 $\mathbf{n}(z_1, z_2, z_3)$ 作为局域坐标的 $\mathbf{z}^*(z_1, z_2, z_3)$, 即有:

$$\mathbf{z}^*(z_1, z_2, z_3) = \mathbf{n}(z_1, z_2, z_3) \quad (16)$$

以面元的平面作为局域坐标系的 $X^*O^*Y^*$ 面, 面元中心点与面元一点的矢量方向作为局域坐标系的 $\mathbf{x}^*(z_1, z_2, z_3)$ 轴, 由右手坐标系法则得出 $\mathbf{y}^*(z_1, z_2, z_3)$ 轴, 公式如下:

$$\mathbf{y}^*(z_1, z_2, z_3) = \mathbf{z}^*(z_1, z_2, z_3) \times \mathbf{x}^*(z_1, z_2, z_3) \quad (17)$$

可得出 $\mathbf{y}^*(z_1, z_2, z_3)$ 的分量为

$$\begin{aligned} y_1 &= z_2x_3 - z_3x_2 \\ y_2 &= z_3x_1 - z_1x_3 \\ y_3 &= z_1x_2 - z_2x_1 \end{aligned} \quad (18)$$

面元局域坐标系和全局坐标系之间的转化关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.4.2 红外热像计算流程

基于逆向蒙特卡洛射线追踪法结合红外辐射传输理论的海面背景下舰船红外热像计算模型的整体计算流程如图 7 所示。基于仿真获取的舰船表面温度场、背景海面场、海面大气环境中的大气透过率与背景辐射, 以及海水物性等对应的数据文件, 编写红外程序模型进行仿真。在仿真模拟中, 根据不同工况设置相机的焦距以及探测角度, 在仿真程序读取数据后, 由模型算法中设置的相机焦点发射出数量足够多的光束, 每条光束的方向根据相机焦点与相机平面上的像素点确定。确定光线的发射方向后, 对每条光线进行逆向追踪, 通过光线和落点面元的参数计算该面元的红外发射率 α , 并利用程序函数产生 0~1 的随机数 R , 以确定该光线在落点面元是被吸收还是反射。若随机数大于该面元处的发射率则光束反射, 并对此光线继续追踪, 直到抵达最终被吸收位置。利用相对性原理计算到达特定方向的红外辐射能量。通过追踪、统计每条光线的结果, 利用热辐射传递过程中的相关概念进行分析计算, 得出辐射能量的统计结果。

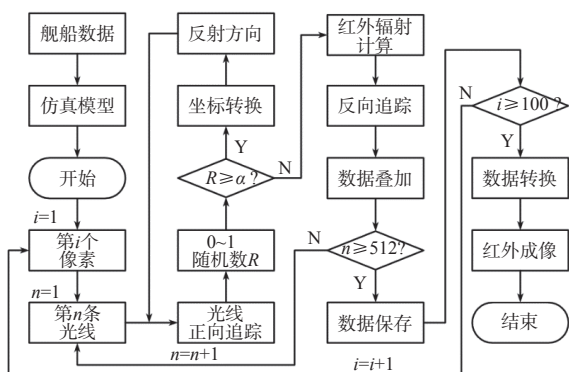


图7 海面舰船目标计算流程图

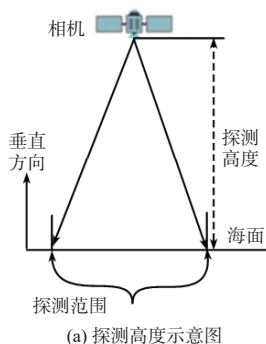
Fig. 7 Flow chart for sea surface ship target calculation

其中利用 CFD 仿真软件获取的舰船表面温度场和模拟的背景海面温度场均是由数量足够多的三角形面元组成。在对光束进行逆向追踪的过程中,当光线的最终落点在舰船表面温度场和海面耦合的区域中时,利用相关算法获取舰船表面的辐射能量值;当光线落点在不重叠的区域中时,则计算海面的辐射能量值,而用于计算每条光束落点面元的辐射能量的温度为该面元的重心温度值。获取光束落点辐射能量值后,对光线进行正向追踪,结合红外信号的大气透过率,最终获得该光束对相机像素的贡献值。当仿真结束后,相机平面像素点可认为是由一系列的红外辐射能量数值构成,通过对辐射数据进行图像化处理,最终获得海面背景下舰船的红外热像。

3 结果分析

3.1 红外探测器参数

分别模拟探测器在探测高度为 3 km、5 km、10 km 时的海面舰船热像,探测高度示意图如图 8(a) 所示。探测角度为舰船垂直方向,探测天顶角和方位角分别为 10°和 30°,天顶角和方位角分别为 30°和 60°的海面舰船热像,探测角度示意图如图 8(b) 所示。定义红外相机焦距为相机焦点与像素面垂直方向的距离,相机焦距如图 8(c) 所示。



(a) 探测高度示意图

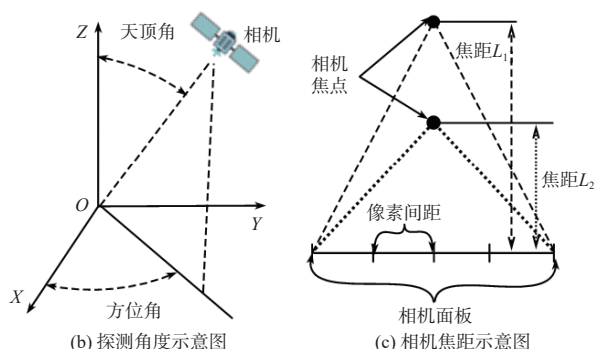
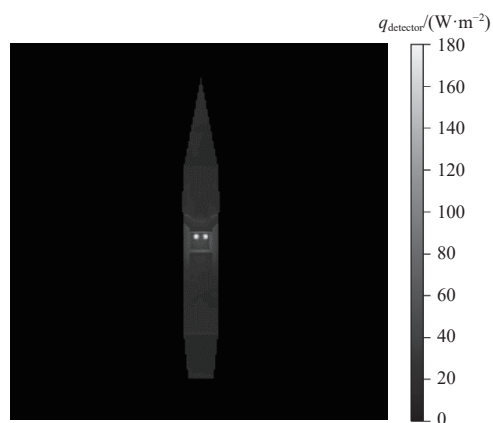


图8 探测示意图

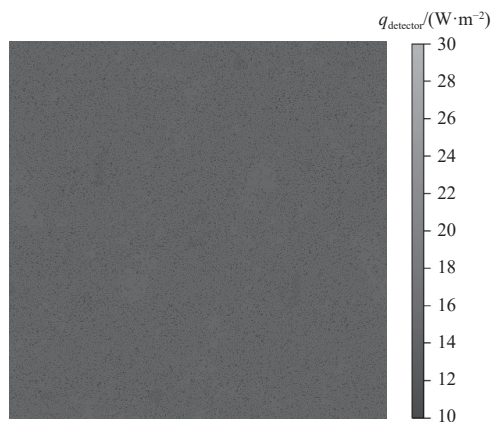
Fig. 8 Schematic diagram of detection

3.2 舰船与海面热像

基于红外仿真模型获取了无背景海面的舰船热像,如图 9(a) 所示。热像中舰船目标的烟囱和动力舱的红外特征最明显,和仿真获取的舰船温度场分布结果一致,这些部位是舰船的主要辐射热源,也是识别舰船目标的重要信息。建立的背景海面的热像如图 9(b) 所示,由于海面粗糙度的影响,使得海面的热像呈现出斑点交错的特征。



(a) 舰船热像(无海面背景)



(b) 纯海面热像

图9 舰船与海面热像

Fig. 9 Thermal images of ship and sea surface

3.3 不同探测高度海面舰船热成像

探测条件为垂直方向, 相机焦距为 150 mm 时, 红外探测设备在不同探测高度的红外热像如图 10 所示。从图 10 可以看出, 识别舰船红外特征的主要位置在舰船烟囱和动力舱等温度较高位置, 且随着探测高度的增加, 舰船目标整体辐射亮度与背景海面的差异减弱, 识别海面舰船目标的难度增加。这是由于大气对红外信号的吸收影响增加, 以及相机的地面分辨率变小, 使其捕获的细节变得比较粗糙, 导致热像中舰船目标的识别难度增加。

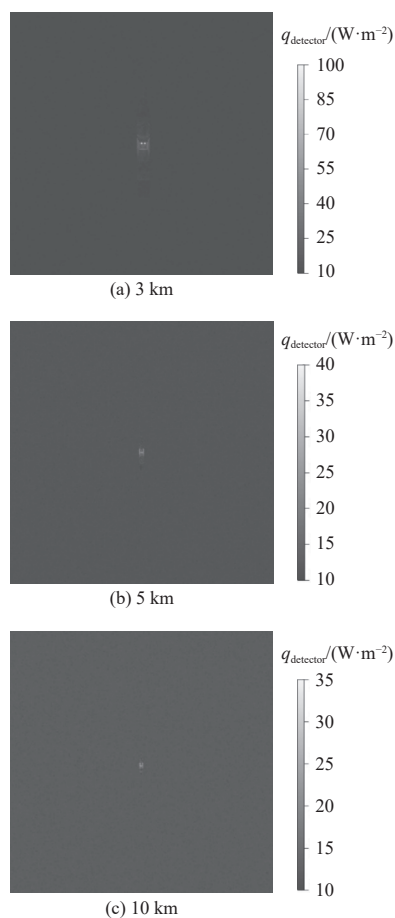


图 10 不同探测高度下的融合热像

Fig. 10 Fusion of thermal images at different detection heights

3.4 不同探测角度的海面舰船热像

探测高度为 3 km, 相机焦距为 150 mm 时, 不同探测角度的海面舰船红外热像如图 11 所示。从图 11 可以看出, 随着探测角度的增加, 红外相机捕捉的海面红外信号较弱, 使得舰船目标的红外特征与海面背景差异变弱。在垂直角度可获得较详细的舰船目标红外特征, 识别舰船目标时相对容易。

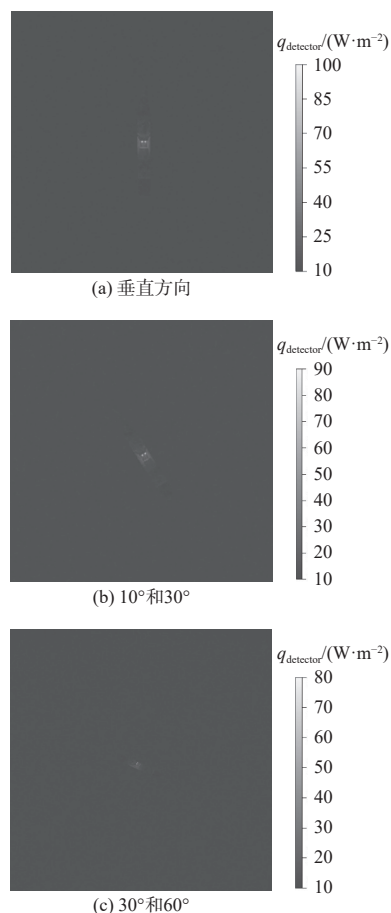
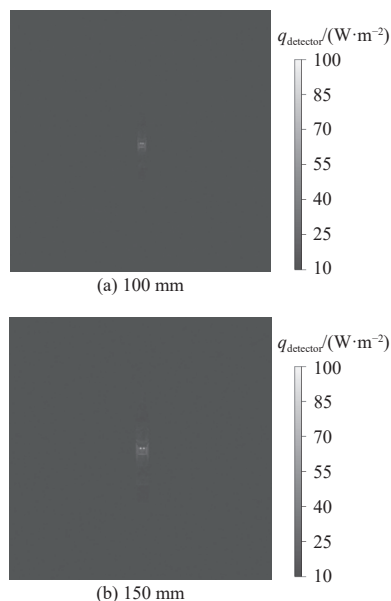


图 11 不同探测角度下融合热像

Fig. 11 Fusion of thermal images at different detection angles

3.5 不同相机焦距的海面舰船热成像

探测高度为 3 km, 探测角度为垂直方向, 不同相机焦距的海面舰船红外热像如图 12 所示。从图 12 可以看出, 随着相机焦距的增加, 其地面分辨



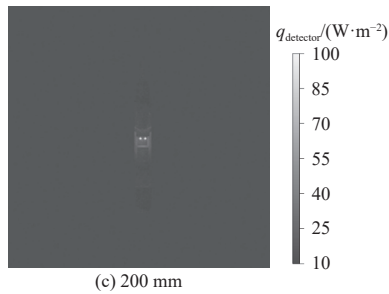


图12 不同相机焦距下的融合热像

Fig. 12 Fusion of thermal images at different focal lengths

率变大,进而使得探测器捕捉到的海面舰船的红外辐射特征信息较为详细。当焦距为200 mm时,获取的红外热像中海面舰船的红外特征更加详细,可更容易地识别舰船目标。

4 结论

本文基于逆向蒙特卡罗射线追踪法建立了红外仿真模型,实现了对海面背景下的舰船目标的红外成像仿真。以此为基础,获取了在不同探测条件下 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的海面舰船的红外热像,并得出了以下结论。

1) 在海面舰船的红外热像中,舰船的动力舱和锅炉烟囱部位的红外特征是识别舰船的主要部位,结合舰船温度场分布,舰船的动力舱和锅炉烟囱是进行红外隐身设计优化的重要部位。

2) 随着探测高度的增加,由于大气成分和相机地面分辨率的影响,红外相机捕捉的目标信号相对粗糙,使得舰船与背景海面的红外差异减弱,识别目标的难度增加。

3) 在不同的探测条件下,适当的调整相机焦距参数可以捕获到较详细的目标红外信号,对识别目标极其重要。

本文通过建立海面背景下的舰船红外热像仿真模型,为海面舰船的红外探测预警及隐身提供了相关理论依据。目前的研究阶段仅仅开展了模型仿真部分的工作,并没有结合实际的海面舰船红外探测实验进行验证,未来可以通过建立简化实验,验证利用红外技术实现对海面舰船目标探测识别的可靠性。

参考文献:

[1] HAGT E, DURNIN M. Space, China's tactical frontier[J]. *Journal of Strategic Studies*, 2011, 34(5): 733-761.

[2] 林维德,邢平平,洪家琳.舰船普通排气系统的红外特性[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, 19(2): 125-128.
LIN Weide, XING Pingping, HONG Jialin. Infrared characteristic of marine exhaust eductor system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 19(2): 125-128.

[3] 马艳,田宇.红外仿真中舰船辐射模型建模方法[J]. *战术导弹技术*, 2013, 159(3): 67-70.
MA Yan, TIAN Yu. Modeling method of warship radiation model for infrared simulation[J]. *Tactical Missile Technology*, 2013, 159(3): 67-70.

[4] 王学伟,王世立,李珂.舰船目标红外图像特性研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 837-840.
WANG Xuewei, WANG Shili, LI Ke. Characteristic of ship target IR image[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 837-840.

[5] 梁英,肖卫国,王力,等.舰船目标红外辐射特性建模与仿真技术研究[C]//中国指挥与控制学会.北京:北京控制与电子技术研究所,2014: 5.
LIANG Ying, XIAO Weiguo, WANG Li, et al. The research of modeling and simulation technology for the infrared radiation characteristics of ship target[C]//CICC 2014: Chinese Institute of Command and Control. Beijing: Beijing Institute of Control and Electronic, 2014: 5.

[6] MASUDA K. Influence of wind direction on the infrared sea surface emissivity model including multiple reflection effect[J]. *Papers in Meteorology & Geophysics*, 2012, 63: 1-1.

[7] 娄树理,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 Shuli, ZHOU Xiaodong. Research on infrared reflectance of anisotropic rough sea surface[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, 23(3): 277-282.

[8] LEE S M, SOHN B J. A new description of small-scale and large-scale roughness in the fast ocean surface emissivity model[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2021, 38(3): 501-510.

[9] HOU Mingdong, ZHU Yutong, SHENG Siyang, et al. Rapid calculation of atmospheric molecular absorption characteristics in the terahertz band based on wideband K-distribution method[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 134: 104911.

[10] ZHANG Sheng, LIU Yong, LUO Qing. Research on deviation theory of atmospheric transmittance and solution for deviation extreme value[J]. *Urban Climate*, 2022, 42: 101137.

- [11] BERK A, HAWES F. Validation of MODTRAN®6 and its line-by-line algorithm[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 203: 542-556.
- [12] WEI J, LEE Z, LEWIS M, et al. Radiance transmittance measured at the ocean surface[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11826-11837.
- [13] PECKHAM J, O'YOUNG S, JACOBS J T. Comparison of medium and long wave infrared imaging for ocean based sensing[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 10(3): 112-128.
- [14] LAPIERRE F D, ACHEROY M. Performance enhancement and validation of the open-source software for modeling of ship infrared signatures (OSMOSIS)[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010, 234(7): 2342-2349.
- [15] LIN J, MA J, WU K F, et al. Research of ship scene simulation based on SE-workbench-EO[C]//AOPC 2017: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications. Beijing, China: SPIE, 2017: 218-224.
- [16] YU C F, ZHANG H, ZHENG G F. Research on infrared imaging simulation technology of ocean scene[C]//AOPC 2021: Optical Sensing and Imaging Technology. Beijing, China: SPIE, 2021: 255-259.
- [17] 杨利红, 赵晨曦, 李鹏飞, 等. 太阳辐射环境下舰船目标的红外仿真与分析[J]. *西安工业大学学报*, 2023, 43(6): 537-544.
- YANG Lihong, ZHAO Chenxi, LI Pengfei, et al. Infrared simulation and analysis of ship targets in solar radiation environment[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2023, 43(6): 537-544.
- [18] 黄子亮, 张昊春, 王琦. 舰船尾迹和海面红外仿真成像[J]. *应用光学*, 2023, 44(2): 286-294.
- HUANG Ziliang, ZHANG Haochun, WANG Qi. Infrared simulation imaging of ship wakes and sea surface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 286-294.
- [19] BRUTSAERT W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies[J]. *Water Resources Research*, 1975, 11(5): 742-744.
- [20] TAM W G, ZARDECKI A. Multiple scattering corrections to the Beer-Lambert law. 1: Open detector[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(13): 2405-2412.
- [21] 甘念重. 船舶主机热平衡分析及其余热利用[J]. *船海工程*, 2008, 37(2): 66-69.
- GAN Nianzhong. Heat balance analysis and waste heat utilization for main engines in vessels[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(2): 66-69.