

浮空器平台海雾背景下红外偏振特性分析及作用距离建模

叶敏锐^{1,2}, 崔文楠², 黄夏阳², 张涛^{1,2,3,4*}

(1. 上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院红外智能感知重点实验室, 上海 200083)

摘要: 研究旨在通过仿真实验揭示红外偏振成像系统在浮空器平台海雾背景下的探测优势。首先, 基于偏振双向反射分布函数, 分析了偏振特性随观测角度变化的规律, 研究结果表明红外偏振在浮空器斜视成像中的适用性。其次, 借助蒙特卡洛方法和MRTD模型, 构建了红外偏振成像系统的最大作用距离模型, 从而验证了红外偏振成像相较于红外强度成像在海雾背景下特征保持和探测距离上存在优势。为红外偏振技术在浮空器平台上的部署应用, 提供了理论分析和仿真依据。

关键词: 红外偏振; 作用距离模型; 偏振双向反射分布函数; 蒙特卡洛方法; 浮空器平台

中图分类号: TP702

文献标识码: A

Analysis of infrared polarization characteristics and modeling of operating distance on aerostat platform in sea fog

YE Min-Rui^{1,2}, CUI Wen-Nan², HUANG Xia-Yang², Zhang Tao^{1,2,3,4*}

(1. ShanghaiTech University School of Information Science and Technology, Shanghai 201210, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The study aims to reveal the detection advantages of infrared polarization imaging systems deployed on aerostat platforms in sea fog conditions. Firstly, based on the polarization bidirectional reflection distribution function, this research analyzes how polarization characteristics vary with observation angles, demonstrating the applicability of infrared polarization in oblique imaging from aerostats. Secondly, by using the Monte-Carlo method and MRTD model, the study develops a model to determine the maximum operating distance of infrared polarization imaging systems. This model verifies the superiority of infrared polarization imaging over infrared intensity imaging in terms of maintaining features and detection distance under sea fog conditions. The results provide theoretical analysis and simulation evidence supporting the deployment of infrared polarization technology on aerostat platforms.

Key words: infrared polarization, operating distance model, polarization bi-directional reflection distribution function, Monte-Carlo method, aerostat platform

引言

随着科学技术的不断进步, 浮空器平台在海洋监测和目标探测中的应用越来越广泛。浮空器作

为一种高效、灵活的空中平台, 具有长时间滞空、覆盖范围广、无人值守和部署成本低等优点, 具备在海洋环境中定点目标监测能力。在海雾场景中, 由

收稿日期: 2024-09-04, 修回日期: 2024-12-11

Received date: 2024-09-04, Revised date: 2024-12-11

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KGFZD-145-23-05-03)

Foundation items: Supported by Key Program of the Chinese Academy of Sciences(KGFZD-145-23-05-03)

作者简介(Biography): 叶敏锐(2000—), 男, 浙江宁波人, 在读硕士, 主要研究领域为红外成像、偏振成像, E-mail: yemr2022@shanghaitech.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: haozzh@sina.com

于雾滴的散射作用,传统的光学成像和探测手段往往受到严重干扰。偏振探测技术能够有效利用目标物体和背景之间的偏振特性差异,具有出色的目标检测能力和环境适应性。此外,在海雾条件下,雾滴对可见光的散射较为严重,而红外波段则能有效穿透海雾,提供清晰的图像和数据。随着浮空器技术的不断发展,如何利用红外偏振技术提高光电载荷的目标探测能力成为当前浮空器平台海雾背景目标探测的一个难点和热点。

近年来,随着红外偏振技术的不断发展,其在海洋环境目标探测任务中起到重要作用。Zhu 等^[1]建立了基于天基平台的空中目标红外偏振辐射模型,分析了近红外到长波红外目标的偏振特性及偏振辐射规律。Li 等^[2]对不同海雾浓度对线性偏振成像系统目标成像清晰度的影响开展了实验,结果表明清晰度随海雾浓度增加而下降。Ni 等^[3]考虑到海雾对大气透过率的影响,分析了海雾场景的偏振特征,提出基于海面偏振特性的背景辐射抑制方法来增强目标对比度。He 等^[4]对海雾粒子的散射特性进行了分析,结合 Mie 散射理论,提出使用蒙特卡洛方法求解海雾环境下的矢量辐射传输问题。Li-ang^[5]基于红外成像系统作用距离估算最小可分辨温差方法建立了红外偏振成像系统作用距离模型,分析了背景杂波影响下红外偏振成像系统作用距离。Xia 等^[6]利用 Monte-Carlo 光线逆追踪的方法分析了海面的红外偏振辐射特性并通过 Stokes 矢量分量的最小可分辨温差与场景表观温差的差异建立了海面环境中的红外偏振成像系统作用距离模型。上述研究主要对物体表面红外偏振特性、大气辐射传输和红外偏振成像系统作用距离模型分别进行理论分析和实验验证,却没有对浮空器平台的观测需求及完整探测链路开展深入研究。

为了探究红外偏振在浮空器平台目标探测上的应用潜力,本文对浮空器平台海雾背景下的目标红外偏振探测链路进行了建模。依据偏振双向反射分布函数,对不同观测角下目标与背景的偏振特性和对比度进行了分析;采用蒙特卡洛方法对偏振光在海雾中的传输过程进行了仿真,并结合 MRTD 方法建立了红外偏振成像系统最大作用距离模型。

1 红外偏振辐射特性建模

在热辐射环境中,成像系统所获取的目标红外偏振信息主要由两个部分组成:第一部分源自目标自发的热辐射,体现了目标自身固有特性;第二部

分则来自于目标表面对环境热辐射的反射,反映了目标与环境之间的相互作用。对于浮空器平台的目标探测,大多数应用场景为斜视成像。然而,斜视成像下,探测器距离目标距离远,倾斜角度大,会导致目标辐射能量受到严重的大气衰减,目标整体的辐射强度趋近相同。由菲涅耳公式可知,随着入射角增加,反射率 R_s 和 R_p 增加,从而带来镜面反射分量增强。而漫反射一般均匀分布在所有方向不依赖于入射角度。除此之外,镜面反射的反射光相较于漫反射会表现出较大的线偏振特性。这与浮空器平台斜视成像的应用需求高度契合。研究观测角对目标红外偏振特性的影响,对于提升浮空器平台的目标探测能力具有重要意义。图 1 为热辐射环境下斜视成像示意图。

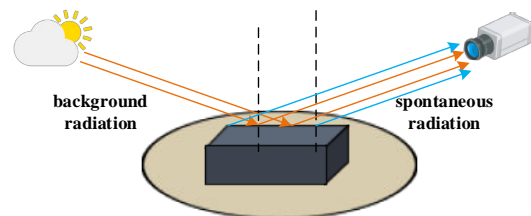


图 1 热辐射环境下斜视成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oblique imaging under thermal radiation environment

1.1 理论建模

为了表征物体表面光的空间分布,使用基于微面元的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)^[7,19]来研究其散射特性。定义为经物体表面反射后的出射辐射亮度 $dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 与入射光的辐射照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 的比值,其表达式为:

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (1)$$

其中,角度 θ 和 φ 分别是天顶角和方位角,并且 i 和 r 分别代表入射方向和反射方向, λ 为波长。图 2 给出了双向反射分布函数模型中方位关系的示意图。其中, z 轴为宏观物体表面法线方向, n 轴为微面元法线方向, β 为光波入射方向和微面元法线 n 之间的夹角, α 为物体表面法线和微面元法线 n 之间的夹角。根据球面三角学公式,各角度之间满足以下关系:

$$\cos(\alpha) = \frac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2\cos\beta}, \quad (2)$$

$$\cos(2\beta) = \cos\theta_i \cos\theta_r + \sin\theta_i \sin\theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i), (3)$$

定义入射光方向与宏观物体表面法线所在平面和入射光方向与微面元法线所在平面间的旋转角为 η_i 。同理,可以将反射光平面之间的旋转角定义为 η_r 。 η_i, η_r 与 $\theta_i, \theta_r, \beta$ 满足下面的关系式:

$$\cos(\eta_i) = \frac{[(\cos\theta_i + \cos\theta_r)/(2\cos\beta) - \cos\theta_i \cos\beta]}{(\sin\theta_i \sin\beta)}, (4)$$

$$\cos(\eta_r) = \frac{[(\cos\theta_i + \cos\theta_r)/(2\cos\beta) - \cos\theta_r \cos\beta]}{(\sin\theta_r \sin\beta)}, (5)$$

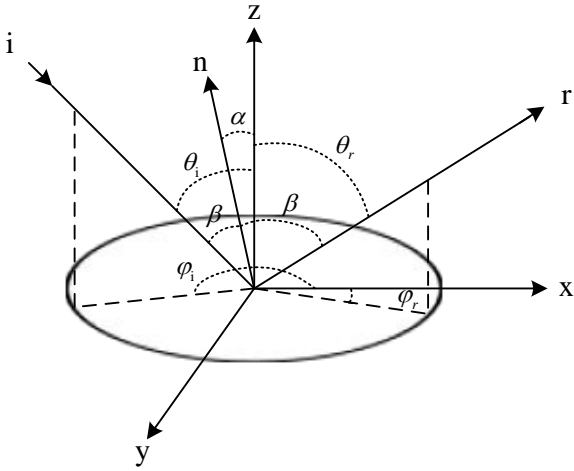


图2 双向反射分布函数模型中方位关系示意图
Fig. 2 Schematic diagram of azimuth relationship in BRDF

在几何光学模型中,一般认为目标表面的全反射辐射由镜面反射和漫反射两部分组成。镜面反射服从菲涅耳反射定律^[8]。漫射散射分量可进一步分为多次反射分量 f_m 和体积散射分量 f_v 。BRDF可以表示为三个分量的总和^[11]:

$$f_{BRDF} = k_s \cdot f_s + k_m \cdot f_m + k_v \cdot f_v, (6)$$

式中 k_s, k_m 和 k_v 分别是镜面反射系数、多次反射系数和体积散射系数。

1.2 基于微面元的pBRDF模型

基于微面元理论的镜面反射理论^[19]认为,物体的表面是由相邻的微面组成的,每个微面遵循菲涅耳反射定律。通过描述宏观面法向量与微面元之间的夹角分布来表示粗糙表面微面元倾角的分布概率,这里采用高斯分布。

$$p(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3(\alpha)} \exp\left[-\frac{\tan^2(\alpha)}{2\sigma^2}\right], (7)$$

式(7)中, α 为物体表面法线与微面元法线间的夹角, $\tan(\alpha)$ 为局部表面斜率, σ 为物体表面粗糙度

常量。

在目标物体表面并非理想的光滑状态下,微面元接收到的散射光会被阻断,也就是出现所谓的遮蔽效应。假设物体表面材质为各向同性,在双向反射分布函数模型中引入遮蔽函数来体现遮蔽效应^[10,23]。

基于微面元理论的偏振化过程,即使用Muller矩阵代替菲涅耳反射率^[9]。偏振双向反射分布函数pBRDF(polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function)中的镜面反射分量 f_{sp} 可表示为:

$$f_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \cdot \exp\left[-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right] \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_r \cos \theta_i} \cdot M_{ij}, (8)$$

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix}, (9)$$

其中, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数^[10,23], M_{ij} 为穆勒矩阵中的元素。

对于粗糙表面,漫反射由表面上的多次散射和体积声散射组成。多次散射是指光线在粗糙表面的微小结构间经历的多次反射。体积散射是指光在材料内部传播时,由于与颗粒或不均匀结构相互作用而发生的散射现象。假设漫反射中的多次散射 f_{mp} 和体积声散射 f_{vp} 都不具有偏振特性,即这些散射过程不会改变光的偏振状态(考虑到漫反射对偏振效应影响较小;在实际仿真中简化模型,仅考虑镜面反射)。由此可以得到包含镜面反射分量和漫反射分量的pBRDF模型表达式:

$$f_{pBRDF} = k_s \cdot f_{sp} + k_m \cdot f_{mp} + k_v \cdot f_{vp}, (10)$$

$$= k_s \cdot \frac{P(\alpha) \cdot G}{4\cos\alpha \cos\theta_i \cos\theta_r} \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} + (k_m \cdot f_{mp} + k_v \cdot f_{vp}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

当温度大于绝对零度时,物体表面辐射除了反射光之外还有自发辐射。其强度分布受到多重因素影响,包括材料发射率、表面微观结构、几何形态特征以及周围环境温度场等。物体的自发辐射不仅贡献了总辐射能量,还会改变其表面辐射的

偏振特性。为了便于对物体表面红外偏振特性进行分析,引入定向半球反射率,即:目标表面上方半球空间内的反射辐射通量与特定入射方向的入射辐射通量的比值。通过对 f_{pBRDF} 在 2π 半球空间内做积分,可求得定向半球反射率:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda) &= \int_{\Omega_r} f_{\text{pBRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos\theta_r d\Omega_r, \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{\text{pBRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos\theta_r \sin\theta_r d\theta_r d\varphi_r, \end{aligned} \quad (11)$$

根据基尔霍夫定律和能量守恒定律可以求出物体表面的定向发射率 ε_{DE} 。已知黑体发射率矩阵为 $\varepsilon_{\text{BB}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,则物体表面红外辐射定向发射率矩阵为:

$$\varepsilon_{\text{DE}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda) = [1 - \rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda)] \cdot \varepsilon_{\text{BB}}, \quad (12)$$

当入射光为自然光 I_n ,目标自发热辐射为 I_t 时,环境热辐射比为 $r = I_n/I_t$ 。目标表面总的红外偏振辐射可以用Stokes矢量表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda) \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \varepsilon_{\text{DE}} \cdot I_t \\ &= I_t \cdot \begin{bmatrix} 1 + (r-1) \cdot \int_{\Omega_r} f_{0,0}^{\text{pBRDF}} \cos\theta_r d\Omega_r \\ (r-1) \cdot \int_{\Omega_r} f_{1,0}^{\text{pBRDF}} \cos\theta_r d\Omega_r \\ (r-1) \cdot \int_{\Omega_r} f_{2,0}^{\text{pBRDF}} \cos\theta_r d\Omega_r \\ (r-1) \cdot \int_{\Omega_r} f_{3,0}^{\text{pBRDF}} \cos\theta_r d\Omega_r \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

根据线偏振度计算公式,可求得粗糙表面红外热辐射偏振度:

$$\text{Dolp} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (14)$$

2 红外偏振矢量辐射传输模型

偏振成像具有“穿烟透雾”的出色性能,常被应用于海洋环境目标探测任务^[20,21]。海雾是一种常见的海洋气象,会对浮空器平台的探测性能产生显著影响。海雾中的水滴不仅会导致可见光和红外光的散射和吸收,还会改变目标物体的偏振特性,从而影响探测系统的性能。由于海雾中的水滴和气

溶胶粒子的尺寸通常在微米级别,本文所研究的波段为中红外波段,故主要粒子散射机制为Mie散射。

通过研究海雾环境下的偏振光传输特性,可以更好地评估浮空器平台在海雾环境中的红外偏振探测性能。本节基于Mie散射理论结合海雾粒子的物理特性,对传统的蒙特卡洛方法进行了改进,并介绍了偏振光在海雾环境中矢量传输过程。

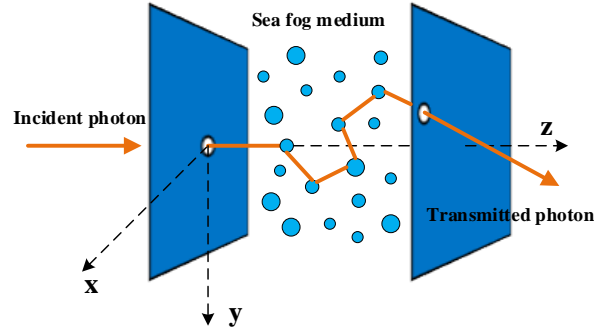


图3 光子在海雾介质中散射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photon scattering in sea fog medium

海雾粒子是海雾形成的基础单元,主要由悬浮在空气中的微小水滴组成。这些水滴的直径通常在1至40 μm 之间,接近球形的不规则粒子,属于液相气溶胶。通常使用Gamma分布来表示海雾粒子的分布情况^[13]。这里给出两种常见平流雾和辐射雾谱分布随能见度变化的表达式^[12]:

$$n_a(r) = 1.059 \cdot 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-0.8359 V^{0.43} r), \quad (15)$$

$$n_r(r) = 3.104 \cdot 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122 V^{0.54} r), \quad (16)$$

式(16)中 V 为能见度, r 为粒子半径。为了对不同能见度下的海雾粒子谱分布进行直观的比较,如图4所示给出了不同能见度下平流雾的谱分布图。从图4中可以看出,当能见度为5 km时,雾滴粒子的总粒子数浓度相对较少($2.89 \times 10^7 \text{m}^{-3}$),粒子半径分布范围较小,其中0~4 μm 半径粒子占较大比例;而当能见度减小为1 km时,雾滴粒子的总粒子数浓度增加($3.62 \times 10^7 \text{m}^{-3}$),粒子半径分布范围变大,4~12 μm 半径粒子所占比重增加。

蒙特卡洛方法模拟偏振光大气传输过程主要分为以下几个步骤:

(1)对光子状态进行初始化。光子沿Z轴射入介质,设定光子的初始方向余弦为 $[u_x, u_y, u_z] = [0, 0, 1]$,初始能量权重 W_0 为1。光子的初始偏振态由1.2小节中计算Stokes矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 确定。

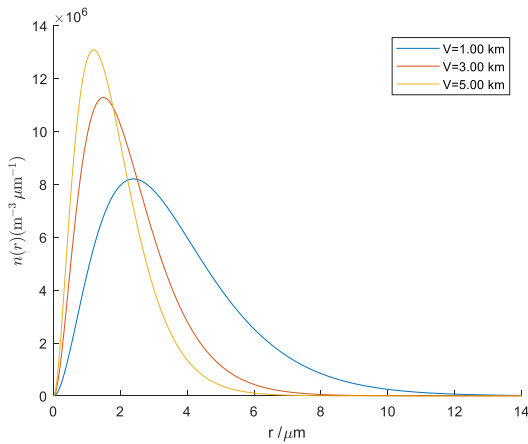


图4 平流雾粒子浓度谱分布

Fig. 4 Spectral distribution of particle concentration in advection fog

(2) 粒子抽样。考虑到海雾粒子的物理特性会对粒子散射能力产生较大影响,这里采用文献[12]中提出的方法对粒子半径进行抽样,并根据粒子半径计算消光系数。

(3) 光子单步自由程 l 抽样。 ξ 为 $[0,1]$ 区间内的随机产生的数,代表光子通过自由程的存活概率^[14], μ_e 为消光系数。

$$l = -\frac{\ln \xi}{\mu_e} \quad (17)$$

(4) 方位角和散射角抽样^[12]。通过抽样得到方位角和散射角,更新方向余弦和光子坐标。

(5) 散射后 Stokes 矢量更新^[26]。偏振态是矢量,在粒子散射过程中与坐标系存在关联。因此在散射过程中,需要先进行一次参考平面旋转,再对散射粒子的穆勒矩阵做乘积,最后作一次参考平面旋转将斯托克斯矢量旋转至对应的散射平面上。

(6) 参考面旋转。当光子经过多次散射到达边界并准备被探测器收集时,需要对斯托克斯矢量进行最后一次旋转,将光子置于探测器的参考系中。此处采用前向散射,旋转角可表示为:

$$\varphi = -\tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_x}\right) \quad (18)$$

(7) 光子存活判定,偏振态统计。光子能量在多次散射过程中会被介质粒子吸收,基于当前散射介质粒子的散射系数和吸收系数对其进行更新。

$$W_n = W_{n-1} \cdot \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} \quad (19)$$

式(19)中, μ_s 是介质粒子的散射系数, μ_a 是介质粒子的吸收系数。设定能量阈值,当更新后能量权

重小于能量阈值时,判定光子不再存活。基于斯托克斯矢量的可叠加特性,对所有穿过大气传输边界且存活光子的斯托克斯矢量进行统计分析,获得偏振光经海雾介质传输后的最终偏振态。

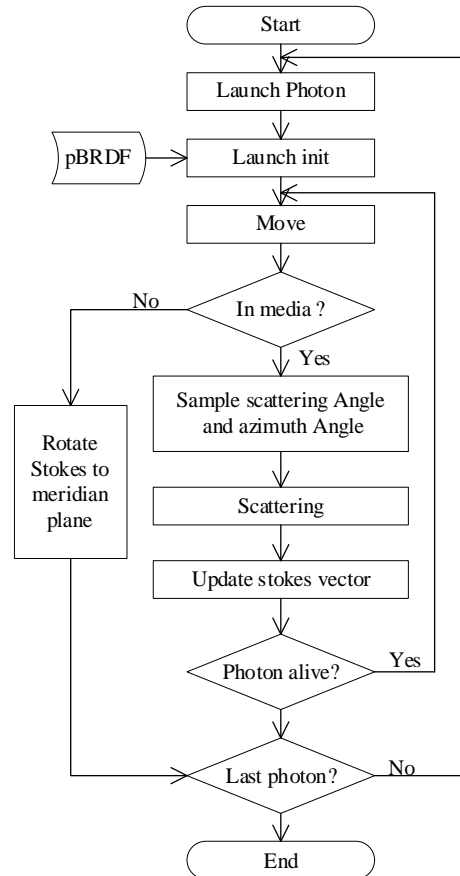


图5 蒙特卡罗仿真流程图

Fig. 5 Flow chart of Monte-Carlo simulation

3 红外偏振成像作用距离模型

MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference, 最小可分辨温差)是评估红外成像系统性能的重要指标之一^[17]。MRTD 是指在特定的空间频率下,红外成像系统能够分辨目标和背景之间的最小温差。这个指标综合了系统的空间分辨率和温度分辨能力,用于描述红外成像系统的探测、识别和辨别能力,常被用于对扩展源目标探测距离建模。其基本原理为:对于空间频率为 f 的目标,目标与背景辐射固有温差在经过大气传输衰减到达红外成像系统时的实际表观温差应大于或等于该空间频率下成像系统最小可分辨温差;同时,目标对系统的张角应大于或等于相应观察要求所需要的最小视角 θ_r 。

$$\begin{cases} \Delta T \cdot \tau(R) \geq MRTD(f) \\ \frac{1}{2f} = \theta_r \leq \frac{H}{R \cdot Ne} \end{cases}, \quad (20)$$

式(20)中: ΔT 为目标与背景的实际表观温差; $\tau(R)$ 为探测距离为 R 时大气透过率; H 为目标的高度; R 为探测距离。 Ne 为给定观察等级下目标对应等效条带数,由Johnson准则确定^[25]。

3.1 噪声等效偏振度

为了更好地评估偏振探测器性能, Jones等^[15]提出了噪声等效偏振度(Noise equivalent Degree of Linear Polarization, NeDolp)这一探测指标。NeDolp是探测器对均匀极化场景成像时产生的标准差,与焦平面阵列(FPA)的阱容量、偏振消光比(ER)、像素串扰和入射辐射偏振态等因素密切相关。Tan等^[16]的研究提出可将NeDolp用于成像系统的最小可分辨偏振度差分析,构建红外偏振成像系统的作用距离模型。

依据文献[15]中提出的偏振探测器响应模型并使用误差传播方法进行求解,可以得到噪声等效偏振度表达式如下:

$$NeDoLP = \frac{\sqrt{1 + 2\delta - 2\delta\beta + D^2 DoLP^2 \left(\frac{1+\delta}{2} - \beta \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) \right)}}{\beta \cdot D \cdot \sqrt{N}}, \quad (21)$$

其中, δ 是读取噪声 σ_{read} 与散粒噪声 σ_{shot} 的比值。 N 为探测器阱容量。 τ 为探测器积分时间,通常被设置为探测器接近1/2阱容量以达到最佳工作状态。 n_{noise} 为暗电流, β 定义为探测器阱中积累的信号电子与总电子数的比值, D 为反映探测器偏振保持的参数可由消光比 e 计算。

$$\delta = \frac{\sigma_{read}}{\sigma_{shot}}, \beta = \frac{N}{2 - \tau n_{noise}}, D = \frac{e - 1}{e + 1}, \quad (22)$$

3.2 最小可分辨偏振度差

本文采用一种常用MRTD计算模型^[17],在其基础上使用NeDolp替换噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)^[22],实现从对温差的度量转变为对偏振度差的度量。给定空间频率 f ,红外偏振成像系统的最小可分辨偏振度差(Minimum Resolvable Polarization Difference, MRPD)可表示为^[16]:

$$MRPD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DT} \cdot f \cdot \frac{NeDolp}{MTF_p(f)} \cdot \left(\frac{a \cdot b}{t_e \cdot f_p \cdot \Delta f \cdot \tau_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (23)$$

$$MTF_p(f) = MTF(f) \cdot MTF_{pp}(f), \quad (24)$$

式中, SNR_{DT} 为观察者能分辨条纹时的阈值信噪比; a, b 分别代表探测器横向和纵向瞬时视场, t_e 是人眼积分时间, f_p 为帧频, Δf 为噪声等效带宽, τ_d 为驻留时间。 $MTF(f)$ 代表红外成像系统的调制函数, $MTF_{pp}(f)$ 为偏振片的调制函数。

$$MTF(f) = MTF_d(f) \cdot MTF_e(f) \cdot MTF_o(f), \quad (25)$$

$$MTF_d(f) = \frac{\sin(\pi \cdot W^{1/2} \cdot f)}{\pi \cdot W^{1/2} \cdot f}, \quad (26)$$

$$MTF_e(f) = [1 + (2 \cdot W^{1/2} \cdot f)^2]^{-\frac{1}{2}}, \quad (27)$$

$$MTF_o(f) = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}(ff_c) - (ff_c) \cdot [1 - (ff_c)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (28)$$

其中, f_c 为光学系统截止频率, $W^{1/2}$ 是系统的瞬时视场, $W^{1/2} = a \cdot b$ 。

3.3 基于MRPD的作用距离建模

偏振度差为目标和背景辐射在通过大气、偏振片以及光学系统等衰减后在探测器上,对四个不同检偏角下辐亮度进行计算得到的偏振度差值。在给定目标和背景温度时,利用普朗克公式计算可以得到目标和背景的0距离辐射亮度 $L_{target}(0), L_{bg}(0)$ 。大气对偏振特征的衰减可以通过基于蒙特卡洛方法的大气矢量辐射传输仿真得到。大气对红外辐射的衰减与传输路径长度相关,可以通过大气平均透过率计算。在实际探测场景中红外辐射可以视作偏振光和非偏振光叠加成的部分偏振光。结合马吕斯定律,偏振片滤波后可以提取指定检偏角 ψ_p 下目标与背景的辐亮度^[5]表达式为:

$$L'_{target}(R, \psi_p) = \tau_{polar} \{ \tau_{atm}(R) \cos^2(\psi_p - \theta_t) L_{target}(0) P_t + 0.5 [\tau_{atm}(R) L_{target}(0) (1 - P_t) + L_{atm}(R)] \}, \quad (29)$$

$$L'_{bg}(R, \psi_p) = \tau_{polar} \{ \tau_{atm}(R) \cos^2(\psi_p - \theta_b) L_{bg}(0) P_b + 0.5 [\tau_{atm}(R) L_{bg}(0) (1 - P_b) + L_{atm}(R)] \}, \quad (30)$$

式(30)中,偏振片透过率为 τ_{polar} ,偏振角为 θ ,偏振度为 P , $\tau_{atm}(R)$ 为大气传输距离为 R 时的大气平均透过率,大气程辐射为 $L_{atm}(R)$ 。

通过1.2小节对物体表面红外偏振特性建模获

得目标和背景的初始偏振态。使用蒙特卡洛仿真对偏振光在海雾介质中的传输过程进行模拟,得到经大气衰减后的偏振度和偏振角。选取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个检偏角度获取通过大气衰减后探测器接收到的辐亮度,用以计算斯托克斯矢量和偏振度。

$$S' = \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'(R,0^\circ) + L'(R,90^\circ) \\ L'(R,0^\circ) - L'(R,90^\circ) \\ L'(R,45^\circ) - L'(R,135^\circ) \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$Dolp' = \frac{\sqrt{Q'^2 + U'^2}}{I'}, \quad (32)$$

通过斯托克斯矢量获取目标与背景的偏振度差为:

$$\Delta Dolp'(R) = Dolp'_{target}(R) - Dolp'_{bg}(R), \quad (33)$$

在实际探测场景中,需要结合 Johnson 准则,将目标等效为条带靶标。根据目标二维等效空间尺度 l_s 计算实际目标张角,对目标空间频率 f 进行修正^[5]。修正后的 $MRPD(f)$ 可表示为:

$$MRPD(f) = MRPD\left(N_e \frac{R}{l_s}\right), \quad (34)$$

当目标和背景的表现偏振度差大于该探测器对应频率的 $MRPD$ 值时,说明仍在红外偏振成像系统的探测范围内;当偏振度差等于探测器对应频率的 $MRPD$ 值时,说明达到了红外偏振成像系统的最大作用距离。同时,作用距离需要满足目标对系统的张角大于等于最小可分辨角。

$$\Delta Dolp'(R) \geq MRPD\left(\frac{l_s \cdot f}{N_e}\right), \quad (35)$$

$$\frac{1}{2f} \leq \frac{\theta}{N_e} = \frac{H}{N_e R}, \quad (36)$$

式中, f 为目标的空間频率; H 为目标探测高度; N_e 为目标等效条带数; $\Delta Dolp'$ 为作用距离为 R 时目标与背景的表现偏振度差。

4 浮空器平台目标红外偏振特性研究

4.1 观测角影响

红外偏振特性是目标表面反射或自发辐射的偏振状态,受观测角、材料特性、表面粗糙度等多种因素影响。考虑到浮空器平台的探测工作模式一般处于斜视成像,故本小节主要从观测角出发对目标红外偏振特性进行分析。设置仿真条件为,探测波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,空气折射率为 $n_1=1.0$,环境热辐射入射角为 45° ,目标材质为涂漆铝合金,表面温

度为 24°C ,表面粗糙度为 0.192 ,折射率为 $1.32+0.481i$;背景材质为草地,表面温度为 20°C ,表面粗糙度为 0.786 ,折射率为 $1.48+0.015i$ 。

图6反映了目标反射热辐射和自发热辐射线偏振度随观测角的变化规律。可以看到目标反射热辐射的红外线偏振度随着观测角变化出现先增大后减小的变化趋势,并且在观测角大约 70° 处达到峰值。峰值主要由 Brewster 角效应产生,即观测角在接近 Brewster 角时,反射光中的 p 偏振分量(平行于入射面)会完全消失,剩下的反射光主要为 s 偏振分量(垂直于入射面),从而使偏振度达到峰值。目标自发热辐射偏振度随着观测角增加而稳定增大,与文献[18,24]中的仿真与实验结果相印证。

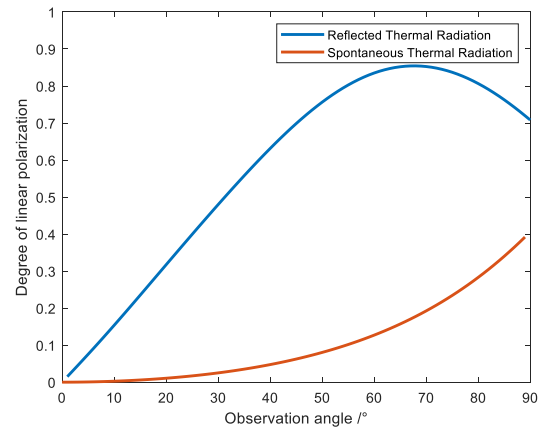


图6 反射热辐射和自发热辐射线偏振度随观测角变化

Fig. 6 Variation of degree of linear polarization of reflected and spontaneous thermal radiation with observation angle

度为 24°C ,表面粗糙度为 0.192 ,折射率为 $1.32+0.481i$;背景材质为草地,表面温度为 20°C ,表面粗糙度为 0.786 ,折射率为 $1.48+0.015i$ 。图7反映了目标和背景对比度随观测角的变化规律。从整体上看红外线偏振度的对比度要高于红外强度对比度,这和选取的目标背景表面材质和散射机制密切相关。物体表面的复折射率影响光的吸收和反射特性,不同材料有不同的复折射率,从而导致偏振特性的显著差异。同时,目标和背景的表现温度差也是重要影响因素之一。从图7中也可以看出随观测角变化,相较于红外强度,线偏振度有着更宽的高对比度范围。

图8反映了不同环境热辐射比下偏振度随观测角的变化规律。从图中可以看出,当环境热辐射强度低于目标自发热辐射强度时,红外线偏振度与环境热辐射强度呈现明显的负相关关系;然而,当环境热辐射强度超过目标自发热辐射强度时,这种相关关系发生反转,表现为显著的正相关特性。这种

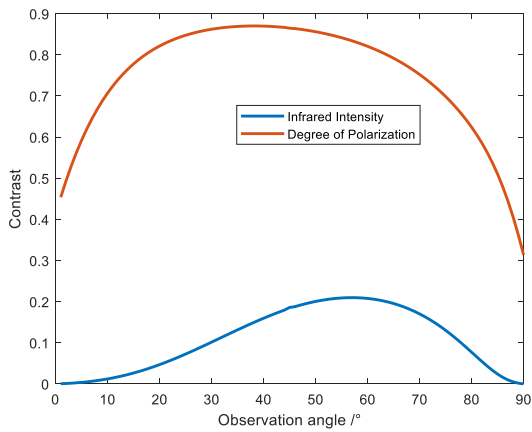


图7 目标/背景对比度随观测角度变化
 Fig. 7 Variation of degree of linear polarization of target/
 background contrast with observation angle

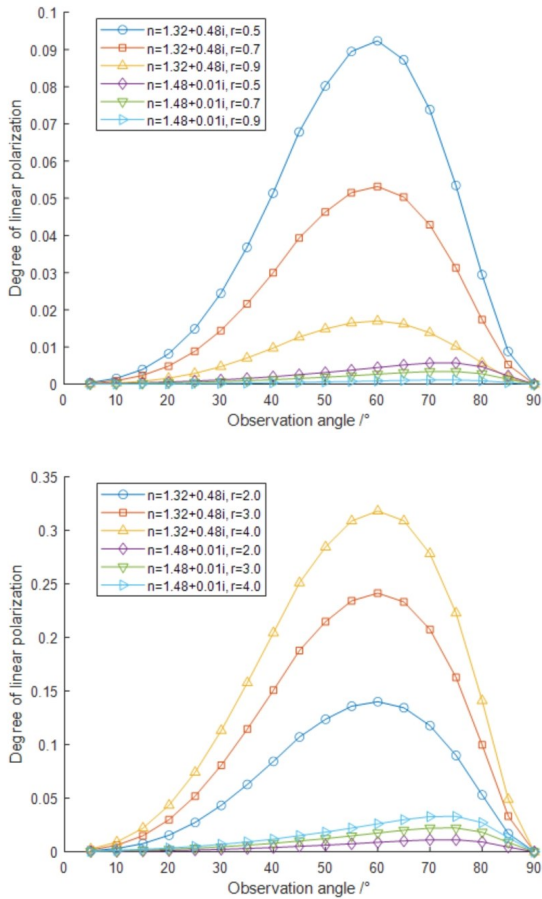


图8 不同环境热辐射比下偏振度随观测角变化
 Fig.8 Variation of degree of linear polarization with observa-
 tion angle under different thermal radiation environment

转变揭示了环境热辐射与目标自发热辐射之间的竞争效应。这说明环境热辐射对红外偏振特性有着重要影响。当环境热辐射大于目标自身热辐射

时,偏振探测的优势更为明显,能够有效弥补传统红外探测的不足;并且在不同热辐射环境中红外线偏振度随观测角的变化始终保持先增大后减小的趋势,契合浮空器平台斜视探测需求。

图9反映了不同粗糙度下偏振度随观测角的变化规律。从图中可以看出物体表面粗糙度越小,偏振特性越强。粗糙度决定了物体表面的光滑程度,物体表面越光滑,镜面反射分量越多,漫反射分量越少,偏振特性就越强。同时物体表面粗糙度会影响光的反射和散射特性,与材料表面的折射率产生关联,从而影响 Brewster 效应。随着物体表面粗糙度的增大,红外线偏振度的峰值观测角也会增大。在浮空器平台探测任务中,利用粗糙度带来的红外偏振特征差异可以有效地帮助区分自然物体和人造物体。

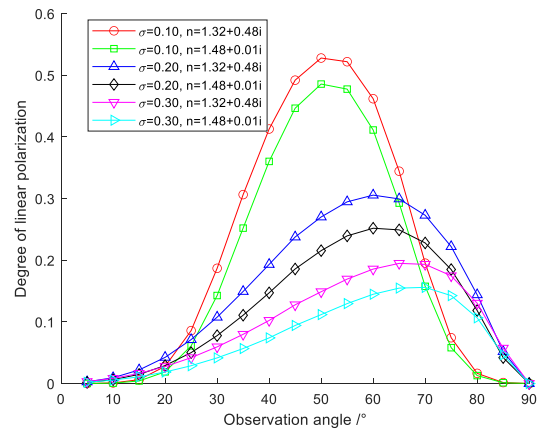


图9 不同粗糙度下偏振度随观测角变化
 Fig. 9 Variation of degree of linear polarization with observa-
 tion angle under different roughness levels

4.2 大气衰减影响

图10反映了在海雾环境能见度为8 km时线偏振度和光强随观测距离的变化。红外光强和线偏振度均表现出随观测距离增加的衰减趋势。红外光强呈现典型的指数衰减特性,衰减速度非常快。这意味着在较长的观测距离上,红外信号的能量可能会急剧减少,甚至接近于零,导致探测系统的性能大大降低。相比之下,线偏振度虽然在初始观测距离内衰减较快,但其衰减速率逐渐减缓。即使在观测距离超过20 km后,线偏振度仍保持在较高水平,并且继续以缓慢的速率下降。这表明偏振特征在海雾环境下具有较好的抗衰减能力。

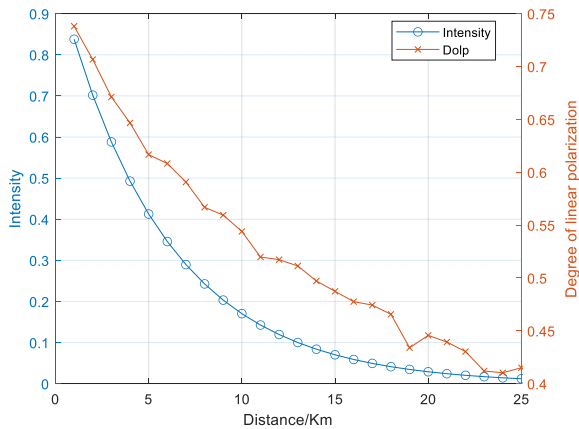


图 10 偏振度和光强随观测距离变化(能见度 8 km)

Fig. 10 Variation of degree of linear polarization and intensity with observation distance (Visibility 8 km)

4.3 红外偏振成像系统最大作用距离

设定大气传输环境为海雾气溶胶背景,使用MRPD模型对表观温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,高4 m、宽3 m的涂层铝合金目标与表观温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的草地背景进行红外偏振成像系统最大作用距离仿真,观测角为 75° 。表1给出了不同观察要求和不同大气能见度下的仿真结果。同样,使用MRTD模型在相同条件下对红外成像系统最大作用距离进行仿真,仿真结果如表2所示。人眼观察的等级可划分为探测(Detection)、识别(Recognition)和辨别(Identification),不同观察等级对应不同等效条带数,由Johnson准则确立^[25]。

表 1 红外偏振成像系统最大作用距离

Table 1 Maximum operating range of infrared polarization imaging system

Visibility	4 km	6 km	8 km	10 km
Detection/(km)	14.54	17.42	18.63	19.43
Recognition/(km)	5.04	5.32	5.44	5.56
Identification/(km)	3.40	3.46	3.55	3.59

表 2 红外成像系统最大作用距离

Table 2 Maximum operating range of infrared imaging system

Visibility	4 km	6 km	8 km	10 km
Detection/(km)	6.32	8.86	11.21	13.58
Recognition/(km)	3.74	4.70	5.41	5.97
Identification/(km)	2.91	3.47	3.86	4.16

从结果可以看出,在不同大气能见度的海雾环境下,红外偏振成像系统在低能见度条件下表现更

优,但在高能见度条件下,红外成像系统表现得更为稳定且具备一定的优势。具体而言,在4 km至10 km能见度范围内,红外偏振成像系统的目标探测距离始终高于红外成像系统,随着能见度的增加,两者性能差距进一步减小。这表明红外偏振成像技术更适用于远距离的目标探测任务,在低能见度条件下表现尤为突出。在高能见度条件下,红外成像系统在识别和辨别上更具有优势,表明在较为清晰的大气条件下,红外成像系统可以更有效地捕捉和分辨目标的细节信息。

值得注意的是,最大作用距离不仅受能见度影响,还与所选目标与背景的偏振特性、大气传输环境以及探测器性能等多种因素密切相关。因此,在实际应用中,应综合考虑这些因素,以优化成像系统的设计和配置。

5 结论

通过本文中的仿真和分析可以得出以下结论:

- (1)当观测角小于布儒斯特角时,红外偏振特征具有随观测角增大而增强的特性,且相较于红外强度特征有着更宽的高对比度范围,符合浮空器平台斜视成像需求。
- (2)在海雾背景大气传输环境中,偏振特征相较于强度特征具有更强的抗衰减能力,红外偏振成像是一种具有前景的海洋目标探测手段。
- (3)在本文给定的观测目标和观测条件下,红外偏振成像系统相较于红外成像系统在能见度为4 km至6 km的较低能见度海雾环境中有着更远的作用距离,能够与红外成像进行优势互补。

针对浮空器平台海雾背景,本文从三个方面:物体表面红外偏振特性、大气辐射传输和红外偏振成像系统自身性能,对红外偏振成像的特点进行了分析。同时,对成像系统最大作用距离进行建模,论证了红外偏振成像相较于红外强度成像在目标探测上的优势,为浮空器平台应用红外偏振技术提供了仿真依据。

References

- [1] ZHU D Y, FU X X, TANG J W, et al. Simulation and analysis of infrared polarization radiation characteristics of air targets against sea surface[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 175-181.
朱德燕,付晓萱,唐骏伟,等.海面空中目标的红外偏振辐射特性仿真分析[J].光学学报,2023,43(12): 175-181.
- [2] LI C, LU W, XUE S, et al. Quality assessment of polarization analysis images in foggy conditions[C]//2014 IEEE In-

- ternational Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway: IEEE, 2014: 551–555.
- [3] NI X Y, YU S T, TANG Y J, et al. The research on polarimetric detection capability of ship targets in the sea fog[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(1): 96–101.
倪歆玥, 余书田, 唐玉俊, 等. 海雾中舰船目标的偏振探测能力研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(1): 96–101.
- [4] HE L Q, DUAN J, ZHANG S, et al. Simulation of polarization transmission characteristics of laser in sea fog environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 311–317.
赫立群, 段锦, 张肃, 等. 激光在海雾环境中偏振传输特性仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 311–317.
- [5] LIANG J A, ZHAO W L, WANG X, et al. Effect of the background clutter on the operating range of infrared polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 261–267.
梁建安, 赵万利, 王霞, 等. 背景杂波对红外偏振成像系统作用距离的影响[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(10): 261–267.
- [6] XIA R Q, WANG X, JIN W Q, et al. Distance model of infrared polarization imaging system used in sea-surface environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 74–78.
夏润秋, 王霞, 金伟其, 等. 海面环境中红外偏振成像系统作用距离模型[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 74–78.
- [7] NICODEMUS F E. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. Washington, DC: National Bureau of Standards, 1977.
- [8] ZHAN H, VOELZ D G. Modified polarimetric bidirectional reflectance distribution function with diffuse scattering: surface parameter estimation[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 123103.
- [9] PRIEST R G, MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988–993.
- [10] TORRANCE K E, SPARROW E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105–1114.
- [11] ZHANG Z, YANG Z, LI G, et al. Degree of polarization model based on a modified three-component pBRDF[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(18): 4777–4785.
- [12] HE L Q. Research on polarization characteristics in sea fog environment based on vector radiation transmission[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000757.
赫立群. 基于矢量辐射传输的海雾偏振特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000757.
- [13] WANG T, NIU S, LÜ J, et al. Observational study on the supercooled fog droplet spectrum distribution and icing accumulation mechanism in Lushan, Southeast China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36: 29–40.
- [14] BOGUICKI D J, PISKOZUB J, CARR M E, et al. Monte Carlo simulation of propagation of a short light beam through turbulent oceanic flow[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 13988–13996.
- [15] JONES M W, PERSONS C M. Performance predictions for micro-polarizer array imaging polarimeters[C]//*Polarization Science and Remote Sensing III*. Bellingham: SPIE, 2007, 6682: 51–61.
- [16] TAN C, WANG S Y, GAO S L. Analysis of the operating distance of infrared polarimetric imaging system considering the non-ideality of the detector[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(6): 876–884.
谭畅, 王世勇, 高思莉. 考虑探测器非理想性的红外偏振成像系统作用距离分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(6): 876–884.
- [17] WANG J, YANG C P, WU J. MRTD calculation of thermal imaging system using MATLAB[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003(5): 56–58.
王娟, 杨春平, 吴健. 热成像系统性能参数 MRTD 的编程计算[J]. *光学与光电技术*, 2003(5): 56–58.
- [18] YANG Z Y, LU G X, ZHANG Z W, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 192–201.
杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 192–201.
- [20] LIANG Y A, YI W N, HUANG H L. Detection of target on ocean background based on polarization imagery fusion[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(1): 60–67.
梁远安, 易维宁, 黄红莲. 基于偏振信息融合的海洋背景目标检测[J]. *大气与环境光学学报*, 2016, 11(1): 60–67.
- [21] LI J J. Research on the optical polarized radiation characteristics of sea targets[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
李金金. 海洋目标光学偏振辐射特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [22] ROGALSKI A. Infrared detectors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [23] WANG A X, WU Z S. Parameter inversion of shadowing function in light scattering model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 332–337.
王安祥, 吴振森. 光散射模型中遮蔽函数的参数反演[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 332–337.
- [24] TANG Q, ZHANG R B, LING J J, et al. Modeling and simulation of thermal emission polarization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(8): 41–46.
汤倩, 张仁斌, 凌晋江, 等. 热辐射偏振建模与仿真[J]. *光电工程*, 2015, 42(8): 41–46.
- [25] ZHOU C H. Modeling and analysis of operating range of infrared polarization imaging system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
周程灏. 红外偏振成像系统作用距离建模与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [26] RAMELLA-ROMAN J C, PRAHL S A, JACQUES S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I[J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4420–4438.