

基于混合辐射偏振模型的空中目标红外偏振特性建模和仿真

燕坤娜^{1,2,3}, 刘海峥^{1,2,3*}, 史泽林^{1,2,3}, 赵泽华^{1,2,3}, 赵春阳⁴

(1. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 面向空中高速目标红外偏振探测需求, 针对空中目标红外偏振特性的计算和图像生成问题, 本文提出适用常见高速目标红外偏振特性的计算方法和仿真流程。该方法基于混合辐射偏振模型, 综合考虑目标表面自身热发射、太阳辐射反射、环境辐射反射及大气传输效应, 建立了空中目标红外线偏振度(DoLP)计算模型框架并给出了具体材质的模型实例化方法, 所建材质样板 DoLP 计算值与实测值偏差小于 10%。仿真流程以高速飞行的 SR-72 侦察机为例, 基于目标材质样板偏振计算模型生成的反射/辐射率矢量数据, 借助 Unity3D 引擎实现了 SR-72 目标红外偏振特性的实时计算仿真, 图像帧率达到 35 帧/s, 生成了不同飞行速度、探测波段(中波/长波)和太阳光照(存在与否)条件下 SR-72 的红外偏 DoLP 图像, 分析了目标红外偏振特性的部分变化规律。本研究为空中目标红外偏振探测及相关评估应用提供数据基础和仿真支撑。

关键词: 空中目标; 偏振图像仿真; 线偏振度; 大气效应

中图分类号: O43

文献标识码: A

Modeling and Simulation of Infrared Polarization Characteristics of Aerial Targets Based on a Hybrid Radiation Polarization Model

YAN Kun-Na^{1,2,3}, LIU Hai-Zheng^{1,2,3*}, SHI Ze-Lin^{1,2,3}, ZHAO Ze-Hua^{1,2,3}, ZHAO Chun-Yang⁴

(1. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

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

4. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To address the need for infrared polarization detection in high-speed aerial targets, this paper presents a practical method for calculating and simulating the infrared polarization characteristics of these targets. Based on a hybrid radiative polarization model, an infrared degree of linear polarization (DoLP) calculation framework for aerial targets and an instantiation method for typical materials are developed. This model framework considers thermal emission, solar and environmental radiation reflections, and atmospheric transport effects. The deviation between the calculated and measured DoLP values for the material samples is less than 10%. Taking the high-speed SR-72 reconnaissance aircraft as an example, the simulation process is based on the reflection/radiance vector data generated by the polarization calculation model of the target material. The real-time simulation of the SR-72 target's infrared polarization characteristics is conducted with the Unity3D engine, and the image frame rate reaches 35 frames per second. The DoLP images of the SR-72 are simulated under varying conditions, including flight speed, detection band (MWIR/LWIR), and solar illumination. The variations in its polarization characteristics are subsequently analyzed. This study provides a data founda-

收稿日期: 2006-08-20, Received date: 2006-08-20,

基金项目: 兴辽英才(XLYC2201001), 科技委基础加强计划重点项目(E21Z0001), 研究所基础研究计划面上项目(E3290402)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61571011, 61302148)

作者简介(Biography): 燕坤娜(1998—), 女, 河南商丘人, 研究生, 主要研究领域为红外偏振建模与图像生成. E-mail: yankunna@sia. cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: liuhz@sia. cn

tion and simulation support for infrared polarization detection and related assessment applications of aerial targets.

Key words: DoLP, pBRDF, Aerial target, Polarization simulation

PACS:

引言

随着航空航天技术的快速发展与持续突破,各类空中高速目标相继出现,由此产生了对探测识别的迫切需求^[1]。偏振作为光的基本属性之一,能够反映辐射源的表面温度、材质、微观结构及观测几何等多维信息,在空中目标探测领域中发挥着重要作用^[2-4]。飞行姿态、速度与高度的动态变化及环境辐射的多样性,给不同状态下空中目标红外偏振特性研究带来了严峻挑战^[1]。为表征和预测空中目标的红外偏振特性,有必要建立适用于此类目标的红外偏振特性计算模型并开展红外偏振仿真研究。红外偏振仿真技术基于红外偏振计算模型^[5-6],通过模拟多种红外场景,生成大量偏振数据^[7-8],为完善偏振理论、拓展偏振应用(偏振探测^[9]、遥感^[10]、工业检测^[11]等)提供重要数据支撑,并且在降低研究成本、缩短研究周期方面也具有重要意义。

国外在红外偏振图像仿真领域起步较早,技术发展较为成熟。2002年,罗切斯特理工学院^[12]在DIRSIG模型框架下引入模块化方法,开展红外偏振特性建模与仿真研究。2007年,Gartley等人^[13]将双向反射分布函数(BRDF)与基尔霍夫定律的半球积分相结合,提出广义双向反射分布函数(pBRDF),为DIRSIG软件中反射和发射偏振建模提供了关键支持。商业仿真软件DIRSIG^[14]已广泛应用于航空航天、环境检测、军事及国防等多个领域。然而,由于DIRSIG偏振功能的用户占比有限,该功能在DIRSIG4版本中已停止迭代更新,DIRSIG5版本亦不再提供相关支持^[15]。相比之下,国内在该领域的起步晚,技术积累相对薄弱,仍有较大的探索与发展空间。2014年,虞文俊等人^[15]通过实验建立了包含多种物体的偏振度数据库,并采用K-均值聚类算法对红外图像进行分类,进而基于该数据库生成红外偏振图像。2018年,张景华等人^[17]综合考虑发射与反射效应,提出一种长波红外偏振度计算模型,并对不同时段和观测角度下海面背景和舰船目标的红外偏振图像开展仿真。2023年,朱德燕等人^[18]基于天基平台构建空中目标红外偏振辐射模型,分析了近红外到长波红外波段的目标偏振特性,并探讨了目标辐射温度、飞行高度、天基探测俯仰角在

红外波段的偏振辐射规律。

近年来,红外辐射特性建模与仿真研究相对成熟,已涌现出多个商业仿真软件^[19-20],但红外偏振特性仿真因缺少模型及仿真方法,发展仍显滞后。本文以空中目标为研究对象,开展其表面红外偏振特性的建模和仿真研究。空中目标红外辐射主要源于自身热发射、太阳辐射反射以及环境辐射反射。本文基于混合辐射偏振模型^[21],结合目标源辐射和大气传输效应,建立空中目标红外线偏振度(DoLP)计算模型框架,并给出具体材质的模型实例化方法。通过实例化计算模型生成全方向的反射和发射率矢量,并以该离线数据为基础,借助Unity3d渲染引擎实现空中目标的红外偏振实时仿真。本文以SR-72侦察机为例,首先对其主体材质面板集开展红外偏振仿真,通过对比DoLP仿真值与测量值,验证偏振计算模型的准确性。随后对SR-72整体目标开展偏振仿真,探究太阳光照条件(有,无)、探测波段(中波、长波)和飞行速度对其红外偏振特性的影响。仿真结果表明,本文提出的计算模型和仿真方法能高效获取空中目标的红外偏振图像,为其红外偏振特性分析及偏振相关应用提供良好的数据支撑。

1 空中目标红外线偏振度计算模型

空中目标表面源辐射主要由表面热发射,太阳辐射反射和环境辐射反射三部分组成,如图1所示。其中,环境辐射的主要成分为地表辐射和大气下行反射辐射。目标源辐射在传输至探测器的过程中,会与大气中的分子、气溶胶等物质相互作用,致使辐射强度衰减。同时,探测器还会接收少量源于大气的路径辐射。

依据高温粗糙表面混合红外DoLP计算模型^[21],目标表面红外线偏振度与粗糙度 σ 、折射率 n 、消光系数 k 、偏置参数 B 紧密相关。为简化模型表述,假定这四个参数与波长无关,且在后续模型中省略其表示。任何高于绝对零度的物体都会持续辐射电磁波。黑体作为理想辐射体,其发射率矢量可表示为 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{bb}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。对于真实物体,当表面温度为 T 时,其表面的定向光谱发射率矢量定

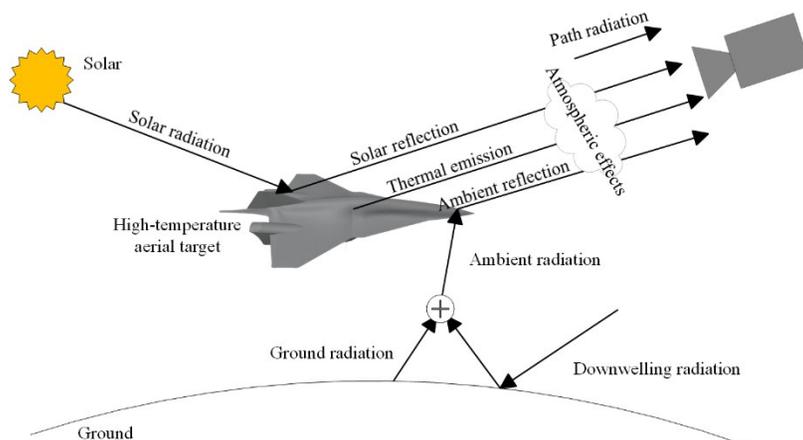


图1 空中目标表面辐射的组成与传输

Fig. 1 The composition and transmission of radiation from the surface of an aerial target

义如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\theta) = \frac{\mathbf{S}^{emi}(\theta, \varphi)}{L_{bb}(T, \lambda)} \quad (1)$$

式中, θ 和 φ 分别为热辐射发射方向的天顶角和方位角, $\mathbf{S}^{emi}(\theta, \varphi)$ 为热发射的斯托克斯矢量, $L_{bb}(T, \lambda)$ 为同温度下黑体的辐亮度, 其值由普朗克公式确定:

$$L_{bb}(T, \lambda) = \frac{1}{\pi} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

式中, c_1 是第一辐射常数, 值为 $3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, c_2 是第二辐射常数, 值为 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$.

发射率矢量的推导计算, 基于对目标表面的反射偏振模型 $\mathbf{F}^{ref}(\theta_i, \theta_s, \varphi)$ 的定向半球积分。该反射模型涉及的辐射方向几何关系如图2所示。

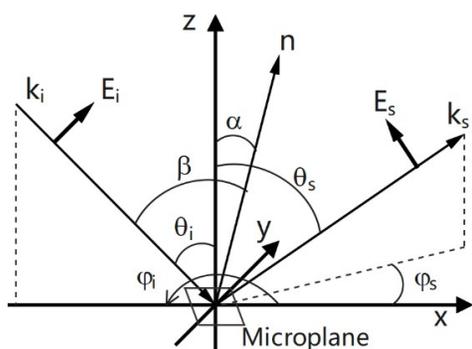


图2 入射方向与反射方向的几何关系

Fig. 2 The geometric relationship between the incident direction and the reflection direction

在图2所示的坐标系中, z 轴与宏观表面法线同向, 来自 (θ_i, φ_i) 方向的入射辐射与法线为 \mathbf{n} 的微平面相互作用后, 其反射辐射从 (θ_s, φ_s) 方向离开。其中, φ 为 φ_i 和 φ_s 之间的相位差, \mathbf{n} 与 \mathbf{z} 的夹角为 α , 与入射方向的夹角为 β 。

当观测天顶角为 θ_v 时, 发射率矢量 $\boldsymbol{\varepsilon}(\theta_v)$ 可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\theta_v) = \begin{bmatrix} 1 - \rho_{00}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{10}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{20}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{30}^{ref}(\theta_v) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\rho^{ref}(\theta_v)$ 表示入射辐射沿观测方向 (θ_v, φ_v) 入射到目标表面时, 反射偏振模型的定向半球积分, 其公式如下:

$$\rho^{ref}(\theta_v) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{F}^{ref}(\theta_v, \theta_s, \varphi) \cdot \cos \theta_s \sin \theta_s d\theta_s d\varphi \quad (4)$$

目标表面反射偏振模型 $\mathbf{F}^{ref}(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ 等于镜面反射分量 $\mathbf{F}^{spec}(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ 与漫反射分量 $\mathbf{F}^{diff}(\theta_v)$ 之和, 即:

$$\mathbf{F}^{ref}(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \mathbf{F}^{spec}(\theta_v, \theta_s, \varphi) + \mathbf{F}^{diff}(\theta_v) = \begin{bmatrix} f_{00}^{spec} + f_{00}^{diff} & f_{01}^{spec} & f_{02}^{spec} & f_{03}^{spec} \\ f_{10}^{spec} & f_{11}^{spec} & f_{12}^{spec} & f_{13}^{spec} \\ f_{20}^{spec} & f_{21}^{spec} & f_{22}^{spec} & f_{23}^{spec} \\ f_{30}^{spec} & f_{31}^{spec} & f_{32}^{spec} & f_{33}^{spec} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, φ 表示观测方向和反射方向的方位角相

位差。

反射偏振模型的镜面分量 $\mathbf{F}^{spec}(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ [22] 采用以下形式:

$$\mathbf{F}^{spec}(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \frac{P(\alpha)G(\theta_v, \theta_s, \varphi)\mathbf{M}(\beta; \eta)}{4\cos\alpha \cos\theta_v \cos\theta_s} \quad (6)$$

式中, $P(\alpha)$ 为微面元法线分布函数, $G(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ 为阴影遮蔽函数。穆勒矩阵 $\mathbf{M}(\beta; \eta)$ [23] 用于描述入射辐射与镜面反射辐射之间斯托克斯矢量的转换过程。

漫反射为非偏振光, 故反射偏振模型的漫反射分量 $\mathbf{F}^{diff}(\theta_v)$ 表示为:

$$\mathbf{F}_{00}^{diff}(\theta_v) = \frac{1}{\pi} (1 - \rho_{00}^{spec}(\theta_v)) \cdot \mathbf{M}_{00}(\beta; \eta) \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{jk}^{diff}(\theta_v) = 0 \quad j \neq 0 \text{ or } k \neq 0$$

根据式(1)和式(3), 当红外探测器的工作波段为 $\Delta\lambda$ 时, 目标自身热发射的斯托克斯矢量 $\mathbf{S}^{emi}(\theta_v, T, \Delta\lambda)$ 可表示为:

$$\mathbf{S}^{emi}(\theta_v, T, \Delta\lambda) = L_{bb}(T, \Delta\lambda) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\theta_v) = L_{bb}(T, \Delta\lambda) \cdot \begin{bmatrix} 1 - \rho_{00}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{10}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{20}^{ref}(\theta_v) \\ -\rho_{30}^{ref}(\theta_v) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, 大气路径辐射为非偏振辐射, 其辐亮度用 L_p 表示。 τ 为目标与探测器之间的大气透过率, 其计算公式如下:

$$\tau = \exp(-\gamma \cdot d) \quad (12)$$

其中, γ 为大气衰减系数, d 为目标与探测器的距离。上述公式中的辐亮度 L_p 和透过率 τ 均可通过 Modtran 软件进行计算。

空中目标表面红外线偏振度 DoLP (取值范围介于 0 至 1 之间) 的计算公式为:

$$DoLP = \frac{\sqrt{(S_1^{total})^2 + (S_2^{total})^2}}{S_0^{total}} \quad (13)$$

若要呈现目标的红外线偏振度图像, 还需将线偏振度计算值量化为灰度 [29]。设定灰度取值范围为 [0, 255], 则线偏振度计算值 $DoLP_{val}$ 量化后的灰

式中, $L_{bb}(T, \Delta\lambda)$ 为黑体辐射亮度 $L_{bb}(T, \lambda)$ 在波段 $\Delta\lambda$ 内的积分值。

太阳辐射为非偏振光, 目标表面反射的太阳辐射 $\mathbf{S}_{sun}^{ref}(\theta_v, \varphi_v, \Delta\lambda)$ 由反射偏振模型和太阳辐照度决定 [24]:

$$\mathbf{S}_{sun}^{ref}(\theta_v, \varphi_v, \Delta\lambda) = \mathbf{F}^{ref}(\theta_{i,sun}, \theta_v, \varphi) \cdot E_{sun}(\theta_{i,sun}, \Delta\lambda) \cdot \mathbf{S}_{np} \quad (9)$$

式中, $\theta_{i,sun}$ 为太阳入射方向与微平面法线的夹角, $E_{sun}(\theta_i, \Delta\lambda)$ 为太阳在目标表面、波长 $\Delta\lambda$ 内的辐照度 [25]。该辐照度可通过 Modtran 软件计算得到。对于非偏振辐射, 其斯托克斯矢量 $\mathbf{S}_{np} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

目标高速飞行时, 其壳体处于高温状态, 表面热发射与太阳辐射反射的辐射能较强。相比之下, 环境辐射的影响相对较小, 其中地表辐射及大气下行辐射反射的贡献较为显著。目标表面的环境辐射反射可视为非偏振辐射, 其表达式 $\mathbf{S}_{amb}^{ref}(\theta_v, \varphi_v, \Delta\lambda)$ [26] 为:

$$\mathbf{S}_{amb}^{ref}(\theta_v, \varphi_v, \Delta\lambda) = \mathbf{F}^{diff}(\theta_i; \lambda) \cdot L_{amb}(\Delta\lambda) \cdot \mathbf{S}_{np} \quad (10)$$

式中, $L_{amb}(\Delta\lambda)$ 是环境入射辐亮度, 该值可由 Modtran 软件计算得出。

考虑大气效应后 [27], 红外探测器接收的总辐射矢量 $\mathbf{S}^{total}(\theta_{i,sun}, \theta_v, \varphi, T, \Delta\lambda; \sigma, n, k, B)$ [28] 可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^{total} &= (\mathbf{S}^{emi} + \mathbf{S}_{sun}^{ref} + \mathbf{S}_{amb}^{ref}) \cdot \tau + L_p \cdot \mathbf{S}_{np} \\ &= (L_{bb}(T, \Delta\lambda)\boldsymbol{\varepsilon}(\theta_v) + E_{sun}(\theta_{i,sun}, \Delta\lambda) \cdot \mathbf{F}^{ref}(\theta_{i,sun}, \theta_v, \varphi) \cdot \mathbf{S}_{np} + \\ &\quad \mathbf{F}^{diff}(\theta_i; \lambda) \cdot L_{amb}(\Delta\lambda) \cdot \mathbf{S}_{np}) \cdot \tau + L_p \cdot \mathbf{S}_{np} \end{aligned} \quad (11)$$

度 GV 为:

$$GV = \frac{DoLP_{val} - DoLP_{min}}{DoLP_{max} - DoLP_{min}} \times 255 \quad (14)$$

式中, $DoLP_{max}$ 和 $DoLP_{min}$ 分别表示线偏振度显示范围 DR 的上下限

2 空中目标红外偏振仿真及结果分析

2.1 三维几何模型

本研究以高超声速侦察机 SR-72 为研究对象, 开展红外偏振仿真分析。高速飞行时, 飞行器会因气动加热效应产生高温, 故其壳体通常采用耐高温材料 [30]。鉴于 SR-72 的高温区域可能采用陶瓷基复合材料, 本研究选取典型陶瓷材料碳化硅作为三维几何模型的壳体材质, 基于上文提出的混合辐射模型框架采用实测偏振数据对模型进行实例化, 从而建立碳化硅壳体材质的偏振辐射计算模型 [21]。

利用 3D MAX 软件构建 SR-72 三维几何模型,其具体形态如图 3 所示。模型壳体由材质统一的三角面元拼接而成,存储格式为 obj 文件。该文件完整记录了模型几何点的坐标、法线方向以及三角面元的详细拓扑信息,为后续研究与应用奠定了完整的几何基础。

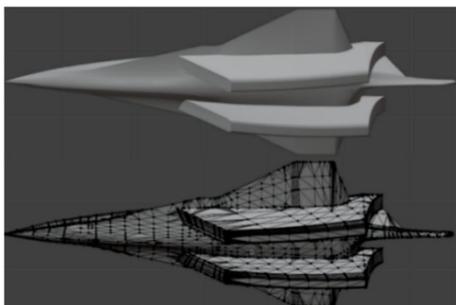


图 3 空中目标 3D 几何模型

Fig. 3 3D geometric model of an aerial target

2.2 目标壳体温度分布的灰度纹理

为分析壳体温度对目标红外偏振特性的影响,本研究运用 Ansys Fluent 软件对 SR-72 壳体的温度分布进行数值模拟^[31]。鉴于实际飞行环境中太阳辐射、发动机及尾焰等因素会显著增加计算复杂度,故本文假设壳体温度仅受气动加热影响。为使温度分布更贴近真实工况,手动提高 SR-72 尾喷口区域的温度。在 Fluent 软件设置中,飞行高度设为 15 km,速度为 3 Ma,大气为理想气体,并选用 Spalart-Allmaras 湍流模型进行计算。目标壳体温度分布的求解结果以灰度图形式呈现,如图 4(a)所示。由图可知,SR-72 头部、机翼和尾喷口的温度明显高于机身,整体温度范围 TR 为 [150 K, 700 K]。基于不同视角的温度分布灰度图,生成三维模型灰度纹理,并建立模型几何点灰度值与实际温度的映

射关系,如图 4(b)所示。在仿真过程中,利用该映射可通过三维模型几何点的灰度值反向推算出相应的实际温度 TV,公式表示为:

$$TV = TR_{min} + (TR_{max} - TR_{min}) \cdot V_{tex}/255 \quad (15)$$

式中, TR_{max} 和 TR_{min} 分别表示温度范围 TR 的最大值和最小值。

2.3 红外偏振仿真流程

本研究基于所建的空中目标红外 DoLP 计算模型,借助 Unity3D 渲染引擎开展空中目标红外 DoLP 图像的实时仿真,详细流程如图 5 所示。在红外 DoLP 计算模型中,半球积分操作增加了模型的复杂度,致使运算耗时较长。此外,在渲染整个目标时,镜面反射 $F^{spec}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 、漫反射 $F^{diff}(\theta_i)$ 与热发射 $\epsilon(\theta_v)$ 偏振模型在同一方向 $(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 上存在重复性计算,进一步加重了计算负担。为实现偏振实时仿真,基于设定的 σ, n, k, B 四个壳体材质参数,以 1° 为间隔,计算全方向的镜面反射率矢量 $F^{spec}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \cdot S_{np}$ 、漫反射率矢量 $F^{diff}(\theta_i) \cdot S_{np}$ 和发射率矢量 $\epsilon(\theta_v)$ 。完成计算后,将所得结果存储为离线数据集,以供后续仿真随时调取。在仿真过程中,Shader 会根据 Unity3D 场景中相机、三维模型几何点与太阳之间的位置关系,获取相关角度参数。接着,以这些角度参数为索引,从离线数据集中调取所需的反射率矢量和发射率矢量。同时,依据灰度与温度的映射关系,利用三维模型几何点的灰度纹理值确定其实际温度值。随后,Shader 将角度参数、反射率矢量、发射率矢量、温度,以及预先设置的太阳辐照度 E_{sun} 、环境辐射亮度 L_{amb} 等辐射参数一同代入空中目标红外 DoLP 计算模型,得到红外 DoLP 计算值。最后,将计算得到的 DoLP 值量化为灰度值,从而生成红外 DoLP 图像。在 Intel Core i7 处理器、32GB RAM、UHD 630 集成显卡及 1920×1080 分辨率的配

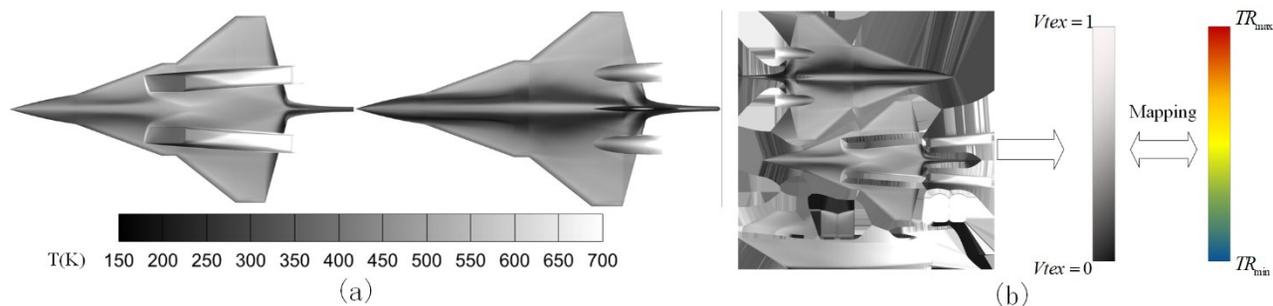


图 4 空中目标壳体温度分布及其灰度映射:(a)温度分布灰度图;(b)灰度与温度的映射

Fig. 4 Temperature distribution of the aerial target shell and its mapping to grayscale: (a) Grayscale image of the temperature distribution; (b) Mapping between grayscale and temperature

置下,图像仿真实时帧率可达35帧/s。

仿真开始前,设定SR-72所在位置及环境参数:经度 120°E ,纬度 30°N ,高度15km,日期2024年7月1日,大气温度216.5K,地表温度300K。基于上述参数,运用Modtran软件或经验公式计算太阳辐照度 E_{sun} 、环境辐射亮度 L_{amb} 等相关辐射输入量。此外,为确定SR-72碳化硅壳体的材质参数,在常温黑暗环境下对高温碳化硅面板进行红外DoLP测量实验。结合测量数据与混合辐射偏振模型,采用遗传算法反演得到相应材质参数: $\sigma=0.2038$, $n=2.3326$, $k=0.005$, $B=0.7508$ 。参数具体反演过程详见文献[21]。

2.4 面板集红外偏振仿真

本文首先基于混合辐射偏振模型^[21],对常温环境下边长为1m的正方形面板进行偏振仿真,比较

不同温度和观测角下DoLP的仿真值与实测值,以验证红外偏振计算模型的准确性。该面板所用材质与SR-72壳体相同,可视作构成SR-72三维几何模型的微小平面单元。如图6(a)所示,在面板自身坐标系XYZ中,X轴为面板与水平面的交线且面板可绕其旋转,Y轴为面板宏观表面法线, n 为构成宏表面的微平面法线, α 为两法线的夹角。仿真环境中,探测器的观测方向垂直于水平面, θ_v 为Y轴与观测方向的夹角(以下简称观测角),面板上方的环境辐射假设为从各个方向均匀入射的非偏振辐射。

在Unity3D场景中,重复创建100个面板,这些面板的观测角和表面温度 T 各不相同,如图6(b)所示。图6(b)中,面板间距为1米,探M测器高度为600米,视场角(FOV)约为 2° 。在该设定下,对任一面板而言,探测器的观测方向均可近似视为垂直于

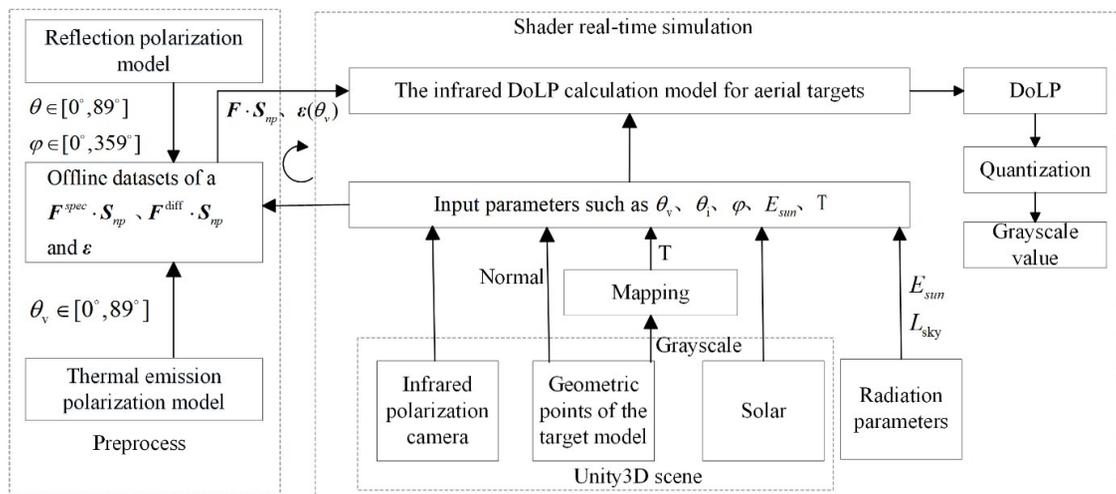


图5 空中目标红外DoLP图像仿真流程图

Fig. 5 Flow chart of the simulation of the infrared DoLP image of aerial targets

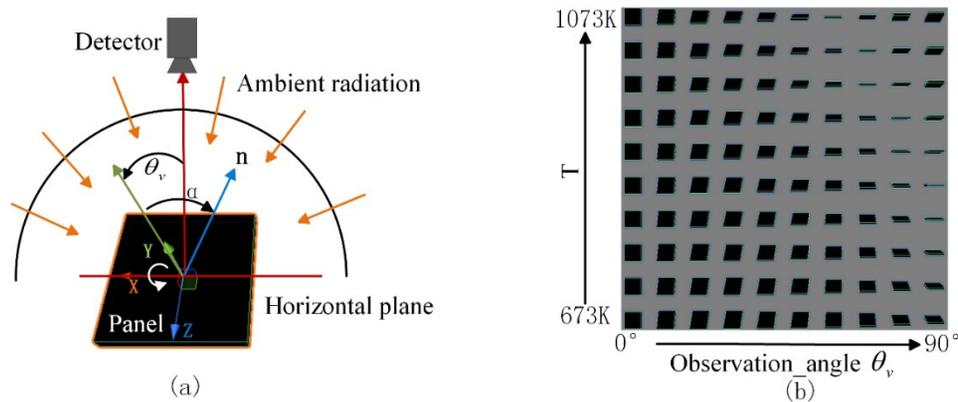


图6 Unity3D中面板集的仿真场景:(a)单个面板与探测器的几何关系;(b)面板集的空间分布

Fig. 6 Simulation scene of the panel array in Unity3D: (a) Geometric relationship between a single panel and the detector; (b) Spatial distribution of the panel array

水平面。同一行的面板温度相同,从左至右观测角 θ_v 由 0° 均匀增至 90° 。同一列面板的观测角 θ_v 相同,从下至上面板温度由 673K 均匀增至 1073K 。结合等式(3)中的热发射偏振模型及反演的碳化硅材质参数可确定 DoLP 的显示范围 DR 为 $[0, 0.25]$ 。

碳化硅面板集的偏振仿真结果如图 7(a) 所示。为对仿真结果进行定量分析,计算图 7(a) 中各面板区域的平均灰度,并根据式(14)反推灰度对应的红外 DoLP 值。将所得 DoLP 计算结果以曲面图的形式呈现于图 7(b)。分析图 7(b) 可知,面板表面红外 DoLP 随观测角增大呈递增趋势,因此高温面板红外偏振特性主要由热发射偏振主导。由于热发射与反射辐射的偏振方向相互垂直,两者叠加会产生退偏效应。随着面板温度升高,热发射辐射能增强,反射偏振的影响减弱,进而致使其表面红外 DoLP

值增大,并且逐渐收敛于热发射自身的 DoLP 值。

当面板温度分别为 1073K 、 773K 和 673K 时,红外 DoLP 的仿真值与测量值的对比结果如图 8 所示。其中,图 8(a) 表示 DoLP 仿真值与测量值的拟合效果,图 8(b) 则表示仿真值 $DoLP_{sim}$ 与测量值 $DoLP_{mea}$ 的相对偏差,公式为 $(DoLP_{mea} - DoLP_{sim})/DoLP_{sim}$ 。分析图 8 可知,碳化硅面板红外 DoLP 的仿真值与测量值具有较高的一致性。当观测角 θ_v 处于 30° 至 80° 区间时,仿真值与测量值的相对偏差小于 10% ,这一结果验证了偏振仿真软件计算的正确性。而当观测角 θ_v 小于 30° 时,由于面板 DoLP 数值较小,测量误差相对较大,导致该区间相对偏差的分析缺乏有效性。

2.5 空中目标红外偏振仿真

在仿真代码实现正确的前提下,本文基于所建

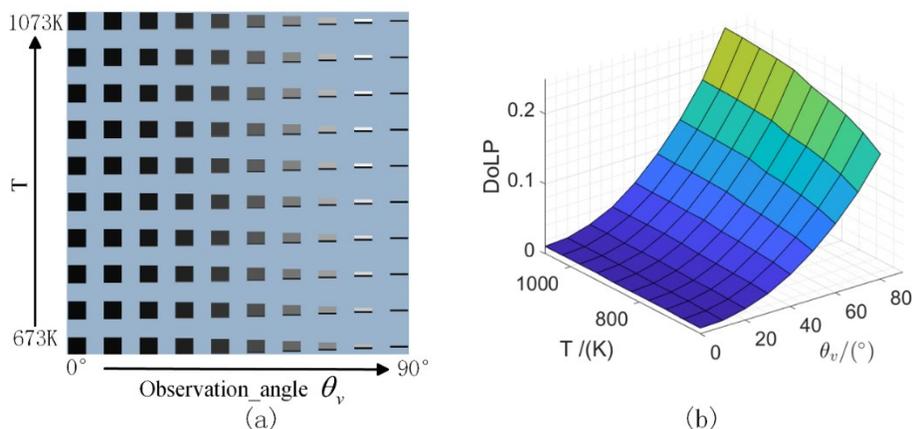


图 7 碳化硅面板集的偏振仿真结果:(a) 红外 DoLP 图像;(b) 红外 DoLP 曲面图

Fig. 7 Polarization simulation results for the SiC panel set: (a) Infrared DoLP image; (b) Infrared DoLP surface plot

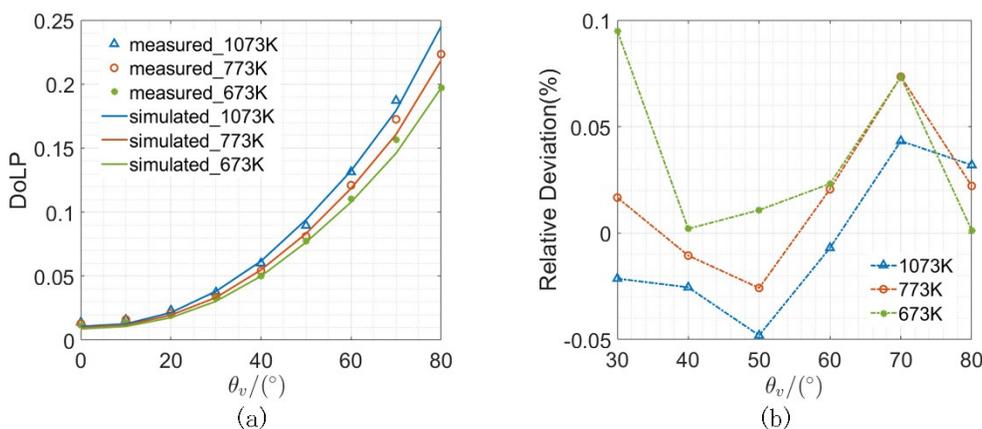


图 8 面板温度分别为 1073K 、 773K 和 673K 时,DoLP 仿真值与测量值的对比结果。(a) DoLP 仿真值与测量值的拟合效果;(b) DoLP 仿真值与测量值的相对偏差

Fig. 8 Comparison between simulated and measured DoLP at panel temperatures of 1073 K , 773 K , and 673 K : (a) Fitting between simulated and measured DoLP; (b) Relative deviation between simulated and measured DoLP

的空中目标红外 DoLP 计算模型,针对 SR-72 开展红外偏振仿真研究,分析其红外偏振特性的变化规律。Unity3D 中的仿真场景如图 9 所示,探测器、SR-72 和太阳位于同一竖直平面内,探测器观测方向和太阳入射方向均与水平面成 30° 夹角。

飞行速度为 3Ma 时,SR-72 的仿真结果如图 10 所示。其中,图 10(a)为 SR-72 的红外强度图像,图 10(b)为红外 DoLP 图像。由图 10 可知,相较于红外强度特征,红外偏振特征受温度、表面法线及观测角度等多种因素的综合作用,能够呈现更丰富的纹理信息。以 SR-72 的高温尾喷口为例,红外强度图像中该区域的亮度较高,但细节纹理模糊不清。而在偏振图像中,该区域各部位间存在显著差异,不同部位间的对接缝也清晰可辨。

为分析空中飞行目标的红外偏振特性,针对不同太阳光照情形(有无)、探测波段(中波和长波)及飞行速度(0.9Ma、2Ma 和 3Ma),对 SR-72 开展偏振仿真。仿真结果呈现于图 11 和 12。图 11 为中波条件下的仿真结果,对应波段为 $3.7\sim 4.8\mu\text{m}$,太阳辐照度 E_{sun} 为 $5.9725\text{W}/\text{m}^2$ 。图 12 为长波条件下的仿真结果,对应波段为 $7.7\sim 9.5\mu\text{m}$,太阳辐照度 E_{sun} 为 $0.7893\text{W}/\text{m}^2$ 。对比图 11(a)和(d)可知,飞行速度为 0.9 马赫时,目标壳体温度较低,热发射辐射能较弱。当无太阳光照时,SR-72 尾喷口末端的温度最高,热发射辐射能相对较强,故该区域偏振度较高。

当有太阳光照时,目标表面红外偏振以太阳光反射偏振为主,机翼部位偏振度较高,尾喷口末端的偏振度较低。当飞行速度提升

至 2 马赫(图 11(b)和图 11(e))时,目标壳体温度升高,热辐射能相应增大,此时目标表面红外偏振以热发射偏振为主。由于太阳反射与热发射的偏振方向相互垂直,两者叠加时会产生一定程度的退偏效应,因此无太阳光照时目标的偏振度会高于有太阳光照时的偏振度。当飞行速度增至 3Ma 时,目标壳体温度继续升高,热发射辐射能继续增大。此时,太阳光照对目标表面红外偏振的影响较弱,图 11(f)与图 11(c)中目标表面红外偏振度接近,细节纹理基本一致。若飞行速度进一步增大,太阳反射的影响可忽略不计,目标表面红外 DoLP 将收敛于热发射自身的 DoLP。在长波条件下,太阳入射辐照度较低,因而图 12 中有无太阳光照对目标红外偏振仿真结果的影响较小。总体上,随着飞行速度和温度的升高,热辐射增强,非偏振辐射在探测信号中的占比减小,目标表面红外偏振度随之提高。与中波相比,低温时长波段的热辐射能更强,因此图 12(c)和图 12(f)中 SR-72 中轴线位置的偏振度高于图 11(c)和图 11(f)。

3 结语

空中目标的红外偏振现象是其表面热发射、太

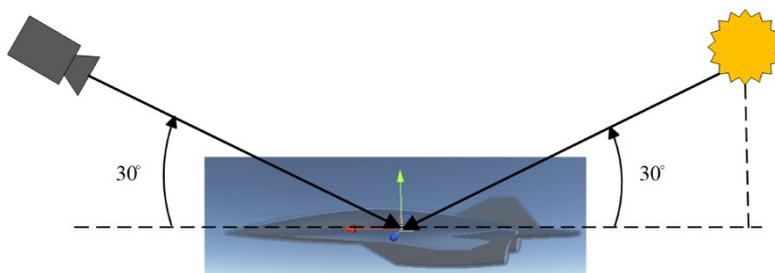


图 9 Unity3D 中 SR-72 的仿真场景

Fig. 9 The simulation scene of SR-72 in Unity3D

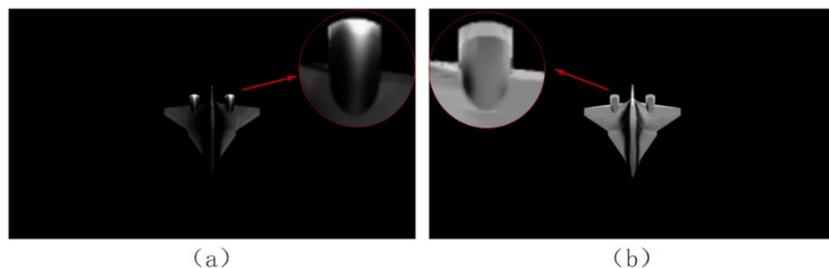


图 10 SR-72 的仿真结果:(a)红外强度图像;(b)红外 DoLP 图像

Fig. 10 Simulation results of the SR-72: (a) Infrared intensity image; (b) Infrared DoLP image.

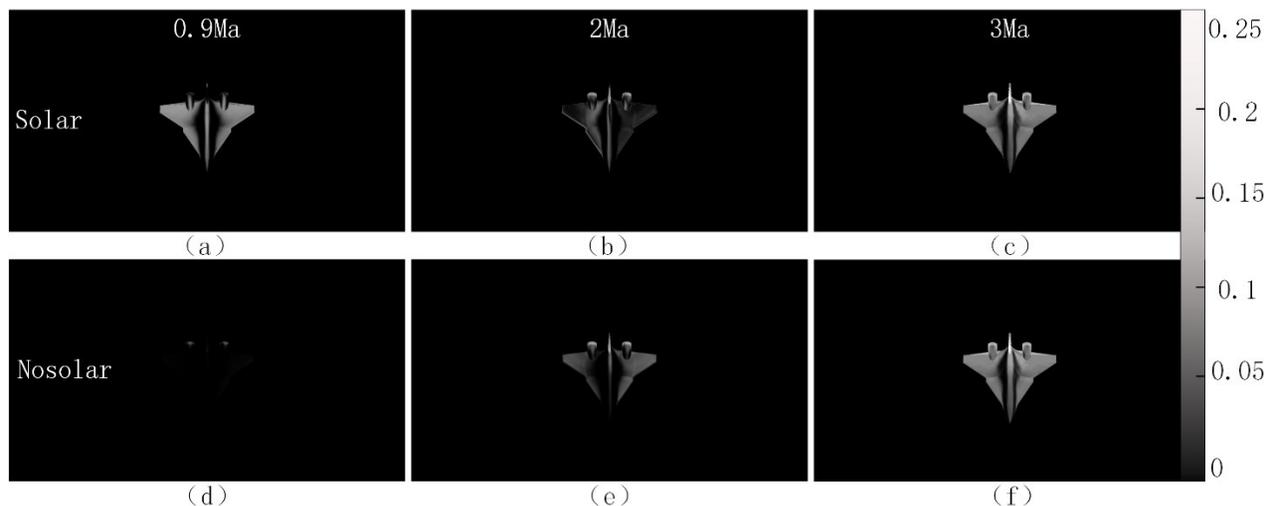


图 11 SR-72 在中波探测时的仿真结果:第一行是在有太阳时的仿真结果,第二行是在无太阳时的仿真结果;同一列图像的飞行速度相同,从左至右依次为 0.9Ma、2Ma 和 3Ma

Fig. 11 Simulation results of SR-72 in the mid-wave infrared band: the first row shows the results with solar illumination, and the second row shows the results without solar illumination. Each column corresponds to the same flight speed, from left to right: 0.9 Ma, 2 Ma, and 3 Ma.

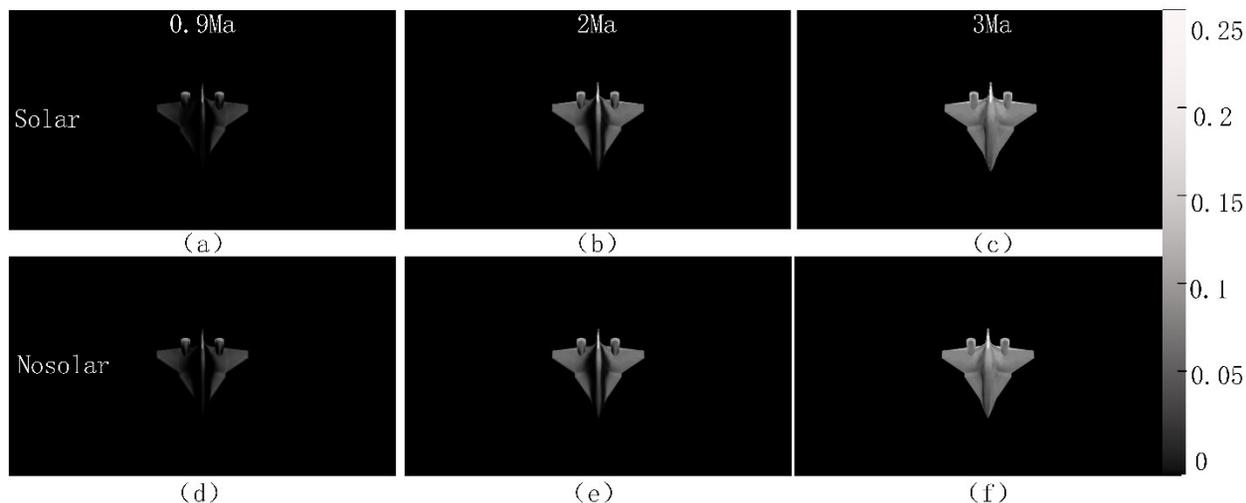


图 12 SR-72 在长波探测时的仿真结果:第一行是在有太阳时的仿真结果,第二行是在无太阳时的仿真结果;同一列图像的飞行速度相同,从左至右依次为 0.9Ma、2Ma 和 3Ma

Fig. 12 Simulation results of SR-72 in the long-wave infrared band: the first row shows the results with solar illumination, and the second row shows the results without solar illumination. Each column corresponds to the same flight speed, from left to right: 0.9 Ma, 2 Ma, and 3 Ma.

阳辐射反射及环境辐射反射共同作用的结果。此外,目标源辐射在传输至探测器的过程中,还会受到大气传输效应的影响。基于此,本文基于混合辐射偏振模型,建立空中目标红外线偏振度(DoLP)计算模型框架,并给出适用于目标具体材质的模型参数反演方法。随后,利用参数实例化后的计算模型,生成反射及发射率矢量离线数据集,借助 Unity3D 渲染引擎,实现空中目标红外偏振图像的实时

仿真。经实际测试,该仿真的实时帧率可达到 35 帧/s。以 SR-72 侦察机为例,本文首先针对常温黑暗环境中,材质与 SR-72 一致的高温面板集开展红外偏振仿真。结果显示,面板红外 DOLP 仿真值与实测值的相对偏差小于 10%,验证了红外偏振计算模型的准确性。最后,按照红外偏振仿真流程,获取了不同太阳光照(有、无)、探测波段(中波、长波)及飞行速度(0.9Ma、2Ma 和 3Ma)条件下 SR-72 的红

外偏振图像。仿真结果表明,空中目标在低速低温条件下,其红外偏振特性主要由太阳反射偏振主导;而在高速高温条件下,则由热发射偏振主导。由于太阳反射与热发射的偏振方向相互垂直,对于高速高温目标而言,太阳反射会引起一定程度的退偏效应。此外,相比于中波,长波条件下太阳入射辐照度较低,太阳光照条件对目标红外偏振特性的影响可忽略不计。当前的目标表面温度分布尚未考虑内部热源的影响,后续可在目标表面温度精确计算基础上进一步扩展,更为准确的计算目标偏振辐射特性。综上所述,本文研究为空中目标红外偏振特性分析方法提供了有价值的参考依据,也为后续红外偏振基础理论及相关应用研究提供了数据和仿真支撑。

References

- [1] Wang X, Gao S L, Jin L, et al. Multi-band infrared radiation characterization and simulation analysis for aerial target [J]. *Acta Photonica Sin*, 2020, 49: 511002.
(王霄, 高思莉, 金璐, 等. 空中目标多波段红外辐射特性描述与仿真分析[J]. *光子学报*), 2020, 49(5): 0511002-1.
- [2] ZHEN Y R, DENG J, BU Y H, et al. Recent advances in on-chip infrared polarization detection[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(1).
(甄玉冉, 邓杰, 布勇浩, 等. 片上红外偏振探测研究进展[J]. *红外与毫米波学报*), 2023, 43(1): 52-62.
- [3] Wang Z, Hong J, QIAO Y, et al. Study of thermal polarization imaging measurement in target recognition [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 196-198.
(汪震, 洪津, 乔延利, 等. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. *Optical Technique*), 2007, 33(2): 196-198.
- [4] Egan W G, Duggin M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization [C]//*Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing III*. SPIE, 2000, 4133: 172-178.
- [5] Liu H, Shi Z, Feng B. An infrared DoLP computational model considering surrounding irradiance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 106: 103043.
- [6] Pang M, Shi Z, Liu H, et al. Polarimetric modeling and measurement approach for refractory material in the mid-wave infrared [J]. *Optics Express*, 2024, 32(10): 17719-17737.
- [7] TAN Chang, WANG Shiyong, GAO Sili, et al. Infrared Polarization Imaging Simulation of Sea Scenes Based on Improved Polarized Bidirectional Reflectivity Distribution Function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 0611001
(谭畅, 王世勇, 高思莉, 等. 基于改进偏振双向反射分布函数的海面场景红外偏振成像仿真[J]. *光子学报*), 2022, 51(6): 0611001
- [8] 丁源, 谭畅, 王世勇, 等. 目标场景红外偏振成像仿真技术发展综述 (特邀) [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2023, 38(5): 13-18.
- [9] Shao X, Du H, Xue J. A target recognition method based on non-Linear polarization transformation [C]//*2007 International Workshop on Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID)*. IEEE, 2007: 157-163.
- [10] Egan W G. Polarization in remote sensing [C]//*Polarization and remote sensing*. SPIE, 1992, 1747: 2-48.
- [11] Morel O, Meriaudeau F, Stolz C, et al. Polarization imaging applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces [C]//*Machine vision applications in industrial inspection XIII*. SPIE, 2005, 5679: 178-186.
- [12] Meyers J. Modeling polarimetric imaging using DIRSIG [J]. 2002.
- [13] Gartley M G, Brown S D, Goodenough A D, et al. Polarimetric scene modeling in the thermal infrared [C]//*Polarization Science and Remote Sensing III*. SPIE, 2007, 6682: 94-105.
- [14] Meyers J P, Schott J R, Brown S D. Incorporation of polarization into the DIRSIG synthetic image generation model [C]//*Imaging Spectrometry VIII*. SPIE, 2002, 4816: 132-143.
- [15] Gartley M, Dank J. Polarimetric image rendering capability of DIRSIG4 [C]//*Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XV*. SPIE, 2022, 12112: 160-165.
- [16] 虞文俊, 顾国华, 刘骋昊. 红外偏振图像的仿真 [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 76-78.
- [17] Zhang Jinghua, Zhang Yan, Shi Guangzhi. 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.
- [18] 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]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1212006-1212006-7.
- [19] Yang X, Zhang H, Liao S. Infrared image simulation technology based on Vega Prime [C]//*International Conference on Image Processing and Intelligent Control (IPIC 2021)*. SPIE, 2021, 11928: 114-123.
- [20] Crow D, Coker C, Keen W. Fast line-of-sight imagery for target and exhaust-plume signatures (FLITES) scene generation program [C]//*Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XI*. SPIE, 2006, 6208: 195-202.
- [21] Yan K, Liu H, Shi Z, et al. An infrared DoLP calculation model with parameters instantiation for high-temp rough surfaces [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 145: 105686.
- [22] Walter B, Marschner S R, Li H, et al. Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces [J]. *Rendering techniques*, 2007, 2007: 18th.
- [23] Kokhanovsky A A. Light scattering reviews 4: single light scattering and radiative transfer [M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [24] Li L. Infrared image simulation of aircraft targets [C]//*International Conference on Remote Sensing, Mapping, and Image Processing (RSMIP 2024)*. SPIE, 2024, 13167: 530-537.
- [25] Cao Y, Cao Y, Wu Z, et al. A Calculation Method for the

- Hyperspectral Imaging of Targets Utilizing a Ray-Tracing Algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(10): 1779.
- [26] Aumeunier M H, Travers J M, Reichle R, et al. Simulation of the infrared views of the upper port VIS/IR imaging system of ITER [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(3): 753-760.
- [27] Willers C J, Willers M S, Lapierre F. Signature modelling and radiometric rendering equations in infrared scene simulation systems [C]// *Technologies for Optical Countermeasures VIII*. SPIE, 2011, 8187: 173-188.
- [28] Qin K, Li M, Feng H, et al. Ground-to-air aircraft infrared image deblurring based on imaging degradation simulation[J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 29721-29739.
- [29] Kim Y C, Bae T W, Kwon H J, et al. Infrared (IR) image synthesis method of IR real background and modeled IR target[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 54-61.
- [30] Göge D, Zimper D, Besser H, et al. Hypersonic vehicles—game changers for future warfare? [J]. *Transforming Joint Air Power: The Journal of the JAPCC*, 2017 (24): 11-27.
- [31] Zore K, Shah S, Stokes J, et al. ANSYS CFD study for high lift aircraft configurations [C]//2018 Applied Aerodynamics Conference. 2018: 2844.