

热辐射环境下目标红外偏振特性分析

杨志勇, 陆高翔*, 张志伟, 宋俊辰

火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025

摘要 红外偏振成像技术具有提升目标识别率、辨别伪装目标等多重优势,但在复杂环境下目标的红外偏振特性容易受到干扰,从而出现错判和漏判的情况。为研究环境热辐射对目标红外偏振特性的影响,基于偏振双向反射分布函数推导了热源照射下目标表面红外线偏振度的解析模型。经过理论仿真及实验验证得出,环境热辐射会影响目标的红外偏振特性。当环境热辐射强度小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负相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越小。当环境热辐射强度大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正相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越大。上述结果表明,当目标受到外部热辐射影响时,红外线偏振度会发生规律性变化。

关键词 光计算; 红外偏振; 热辐射; 偏振双向反射分布函数; 目标偏振特性; 光电防护

中图分类号 TP72

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0220001

Analysis of Infrared Polarization Characteristics of Target in Thermal Radiation Environment

Yang Zhiyong, Lu Gaoxiang*, Zhang Zhiwei, Song Junchen

State Key Laboratory of Ordnance Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract Infrared polarization imaging technology has many advantages, such as improving target recognition rate and identifying camouflage targets, but the infrared polarization characteristics of targets are easy to be disturbed in complex environment, resulting in misjudgment and omission. To study the influence of ambient thermal radiation on the infrared polarization characteristics of the targets, the analytical model for the degree of infrared linear polarization of target surface under heat source irradiation is derived based on the polarization bidirectional reflection distribution function. Theoretical simulation and experimental verification show that the ambient thermal radiation will affect the infrared polarization characteristics of the targets. When the intensity of ambient thermal radiation is smaller than that of the target spontaneous thermal radiation, the degree of infrared linear polarization is negatively correlated with the intensity of ambient thermal radiation, which means the greater the intensity of ambient thermal radiation, the smaller the degree of infrared linear polarization. When the intensity of ambient thermal radiation is greater than that of the target spontaneous thermal radiation, the degree of infrared linear polarization is positively correlated with the intensity of ambient thermal radiation, which means the greater the intensity of ambient thermal radiation, the greater the degree of infrared linear polarization. The above results indicate that the degree of infrared linear polarization will change regularly when the targets are affected by external thermal radiation.

Key words optics in computing; infrared polarization; thermal radiation; polarization bidirectional reflection distribution function; target polarization characteristics; photoelectric protection

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-07-02; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61505254)

通信作者: *lu894118008@163.com

1 引言

与传统成像探测技术相比,红外偏振成像探测技术不仅能获取目标的强度与光谱信息,还能获取目标的偏振特性,可多维度提升目标感知精度和对隐身伪装目标的探测识别能力^[1-3]。欧美军事强国早在 20 世纪 90 年代就开展了偏振成像技术研究,已在目标偏振特性差异规律、全光谱偏振成像探测技术等理论和应用研究方面取得了众多突破性进展。Aron 等^[4]以军用卡车和帐篷为研究对象,实验发现红外偏振成像能提升目标与背景的对比度,这有助于在复杂背景中甄别目标。Dua 等^[5]利用红外偏振成像探测技术实现了对“低小慢”目标的跟踪,极大地提升了打击精准度。美国武器研究发展与工程中心对俄制榴弹炮进行不间断探测,获取了大量长波红外偏振图像,进而建立了完整的数据库^[6]。

对目标物体的红外偏振特性分析成为了攻克偏振探测攻防领域的重中之重,国内外对目标的偏振展开了不同程度的研究。Sandus 总结了热辐射偏振的工作原理,并推导出了微面元表面热辐射的偏振模型^[7]。Wolff 等^[8]在中红外波段对玻璃和铝制材料目标的红外偏振特性进行了实验研究。Gurton 等^[9-10]首先建立了理想模型,并对物体表面的自发热辐射偏振特性进行了理论推导和建模。然后,考虑了表面粗糙度对热辐射偏振特性的影响,并深入研究了热辐射偏振度与粗糙度的相关性。

陈伟力等^[11]建立了红外偏振信息与目标表面折射率、反射率等影响参数间的数学模型,为红外偏振成像系统的探测提供了理论依据和技术支持。张景华等^[12]针对海面场景红外偏振建模问题,提出了一种可表征红外线偏振度与辐射强度、观测角间关系的计算模型。柳祎等^[13]对金属和非金属目标的红外线偏振度的影响因素进行了定量分析,进一步阐述了不同材质目标偏振特性的机理。上述研究主要对目标红外辐射偏振信息的传输路径进行了理论分析和实验论证,没有对热辐射环境下目标红外偏振特性进行深入研究,特别是外部热源辐射强度与目标自身热辐射强度对红外偏振特性的影响。随着作战环境的多样化和复杂化,某些关键装备常受到热辐射影响,进而开展红外偏振探测工作时易受到干扰。因此,研究热辐射环境下目标红外偏振特性具有重要的战略意义。

本文首先以双向反射分布函数为基础模型,构建了目标表面的反射热辐射线偏振度模型和自发热辐射线偏振度模型,并定义了环境热辐射比。然后,提出了包含环境热辐射效应和目标自发热辐射效应的偏振特性数学模型,该模型可表征环境热辐射强度变化对目标表面红外辐射偏振特性的影响。最后,在特定环境下,利用长波红外偏振成像系统对数学模型的仿真结果进行了验证。

2 理论推导

在热辐射环境下,探测器接收到来自目标表面的红外偏振信息主要包括目标自身发出的热辐射信息和表面反射的来自环境中的热辐射信息。当环境的热辐射来自稳定热源时,研究环境热辐射强度与目标自身热辐射强度对红外线偏振度的影响,有助于提升人们对红外偏振特性规律的认识。图 1 为热辐射环境下目标偏振成像示意图,其中 ψ_r 为出射天顶角。

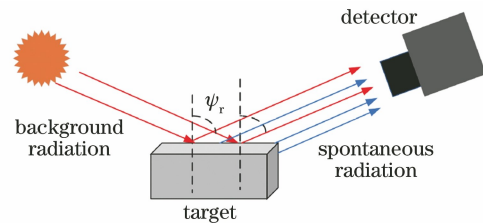


图 1 热辐射环境下目标偏振成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization imaging of target in thermal radiation environment

2.1 偏振特性理论模型

Stokes 矢量通常用来描述偏振光的状态,其能描述所有类型光波的偏振状态,矢量中的所有参数可通过偏振仪器测得,Stokes 矢量的表达式为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^2 + E_y^2 \\ E_x^2 - E_y^2 \\ 2E_x E_y \cos(\varphi_y - \varphi_x) \\ 2E_x E_y \sin(\varphi_y - \varphi_x) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: E_x 和 E_y 分别表示偏振光在 x 轴和 y 轴上的分矢量; φ_y 表示 y 轴上偏振光分矢量的相位; φ_x 表示 x 轴上偏振光分矢量的相位; S_0, S_1, S_2, S_3 的量纲都与光强的单位有关,其中 S_0 表示光的总强度, S_1 表示水平方向线偏振光的强度, S_2 表示对角方向线偏振光的强度, S_3 表示圆偏振光的强度,圆偏振光因强度较小通常被忽略。因此,根据 Stokes 矢量可以求解出偏振光的线偏振度 (degree of linear polarization, DOLP, M_{DOLP})^[14]

$$M_{\text{DOLP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

2.2 基于双向反射分布函数的偏振特性分析模型

当一束确定的光波以天顶角 ψ_i 入射到物体表面随机一点时,光波将以天顶角 ψ_r 出射。物体表面与微元表面的夹角为 ψ_N ,入射光与出射光在系统中形成的方位角为 ϕ_i 和 ϕ_r ,调整入射天顶角可得到不同微面元的概率分布函数。出射光与入射光的比例关系可用双向反射分布函数 (bidirectional reflection distribution function, BRDF)^[15] 表示,光波的方位关系如图 2 所示,其中 β 表示光波入射方向和微面元法线 n 的夹角。

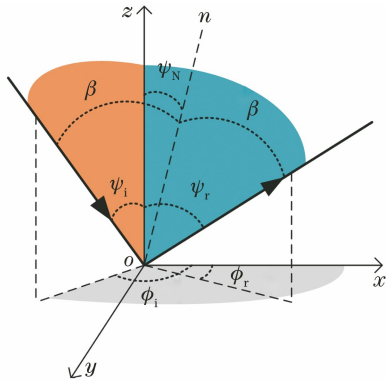


图 2 双向反射分布函数模型中方位关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of azimuth relation in bidirectional reflection distribution function model

BRDF 的概念由美国物理学家 Nicodemus^[16] 提出,其可以表示光以不同角度入射时物体表面光波的反射特性,反射光的变化规律主要由光波的波长、相位、物体表面粗糙度、入射角和反射角等参数决定。本文使用由 Priest 和 Germer 基于 Torrance-Sparrow(T-S)模型改进的 Priest-Germer (P-G)模型^[17],该模型将微面元光波反射视作镜面反射,P-G 模型的数学表达式为

$$f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\psi_i, \phi_i, \lambda)} = \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2 \psi_N}{2\sigma^2}\right)}{2\pi \cdot 4\sigma^2 \cdot \cos^4 \psi_N \cdot \cos \psi_i \cdot \cos \psi_r} \quad (3)$$

式中: $L_r(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda)$ 表示光波经过物体表面后的反射光辐亮度; $E_i(\psi_i, \phi_i, \lambda)$ 表示入射光辐照度; σ 表示表面粗糙度; λ 表示入射光波长。

对 BRDF 进行积分后可得到半球反射率

$$R(f) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \sin \psi_r \cos \psi_i d\psi_r d\phi_r \quad (4)$$

夹角 β 与各参量间的关系满足

$$\cos 2\beta = \cos \psi_i \cos \psi_r + \sin \psi_i \sin \psi_r \cos(\phi_r - \phi_i) \quad (5)$$

入射光与宏观表面法线所在平面和入射光与微面元系统法线所在平面间存在旋转角 μ_i ,同理,反射光也存在旋转角 μ_r 。旋转角由入射天顶角 ψ_i 、反射天顶角 ψ_r 以及夹角 β 决定,这些参数满足

$$\begin{cases} \cos \mu_i = \frac{\frac{\cos \psi_i + \cos \psi_r}{2\cos \beta} - \cos \psi_i \cos \beta}{\sin \psi_i \sin \beta} \\ \cos \mu_r = \frac{\frac{\cos \psi_i + \cos \psi_r}{2\cos \beta} - \cos \psi_r \cos \beta}{\sin \psi_r \sin \beta} \end{cases} \quad (6)$$

当物体表面与微元表面的夹角和粗糙度为定值时,改变光波的入射天顶角和反射天顶角,可获得平面点 BRDF 的变化规律。

为获取光波偏振状态,通常借助菲涅耳 Mueller 矩阵将微面元理论推广到红外偏振领域

$$\mathbf{F}(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) = f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \times \mathbf{M}(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F}(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda)$ 为矩阵函数; $\mathbf{M}(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda)$ 为大小为 4×4 的菲涅耳 Muller 矩阵。入射光矢量 \mathbf{S}_{in} 经过菲涅耳 Muller 矩阵系统后的出射光矢量 \mathbf{S}_{out} 为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} S_{\text{out}0} \\ S_{\text{out}1} \\ S_{\text{out}2} \\ S_{\text{out}3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\text{in}0} \\ S_{\text{in}1} \\ S_{\text{in}2} \\ S_{\text{in}3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

菲涅耳 Muller 矩阵中第 1 行的元素($m_{00}, m_{01}, m_{02}, m_{03}$)影响 $S_{\text{out}0}$ 的大小。同理,矩阵的第 2,3,4 行的元素分别影响 $S_{\text{out}1}, S_{\text{out}2}, S_{\text{out}3}$ 的大小。当入射光为自然光时,起作用的菲涅耳 Muller 矩阵元素为 $[m_{00} \ m_{10} \ m_{20} \ m_{30}]^T$,此时根据琼斯矩阵可得出菲涅耳 Muller 矩阵,则

$$\begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_{ss}^2 + T_{sp}^2 + T_{ps}^2 + T_{pp}^2)/2 \\ (T_{ss}^2 - T_{sp}^2 + T_{ps}^2 - T_{pp}^2)/2 \\ (T_{ss} T_{sp}^* + T_{ss}^* T_{sp} + T_{ps} T_{pp}^* + T_{ps}^* T_{pp})/2 \\ i(T_{ss} T_{ps}^* + T_{ss}^* T_{ps} + T_{sp} T_{pp}^* + T_{sp}^* T_{pp})/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $T_{ss}^*, T_{ps}^*, T_{sp}^*, T_{pp}^*$ 分别表示 $T_{ss}, T_{ps}, T_{sp}, T_{pp}$ 的共轭复数; $T_{ss}, T_{ps}, T_{sp}, T_{pp}$ 可由琼斯矩阵变形得到,计算公式为

$$\begin{bmatrix} T_{ss} & T_{ps} \\ T_{sp} & T_{pp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mu_r & \sin \mu_r \\ -\sin \mu_r & \cos \mu_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \mu_i & -\sin \mu_i \\ \sin \mu_i & \cos \mu_i \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: R_s 和 R_p 分别表示菲涅耳垂直分量和平行分量的反射率,二者表达式为

$$\begin{aligned} R_p(\lambda, \psi_i) &= \left| \frac{n_1(\lambda) \cos \psi_i - n_1(\lambda) \cos \psi_j}{n_1(\lambda) \cos \psi_i + n_1(\lambda) \cos \psi_j} \right|^2 \\ R_s(\lambda, \psi_i) &= \left| \frac{n_1(\lambda) \cos \psi_i - n_1(\lambda) \cos \psi_j}{n_1(\lambda) \cos \psi_i + n_1(\lambda) \cos \psi_j} \right|^2, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: ψ_j 表示光经过物体表面形成的折射角; n_1 表示空气折射率; $n_1(\lambda)$ 表示目标材质折射率。

由以上分析可知,入射光转换得到的偏振状态的 BRDF 可变形为偏振 BRDF (bidirectional reflection distribution function of polarization, pBRDF)。因此,光波经过偏振系统的状态转换过程可表示为

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{in0} \\ S_{in1} \\ S_{in2} \\ S_{in3} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: F_{ij} 表示偏振转换函数,其中 $i, j=1,2,3,4$ 。

由于入射光的圆偏振分量极小,故 pBRDF 可退化三阶矩阵。退化后的矩阵函数可表示为

$$\begin{aligned} F_1(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) &= f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \cdot \\ M_1(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) &= \\ \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2 \psi_N}{2\sigma^2}\right)}{2\pi \cdot 4\sigma^2 \cdot \cos^4 \psi_N \cdot \cos \psi_i \cdot \cos \psi_r} \cdot \\ \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

根据线偏振度公式以及入射光与出射光的状态转换公式,即可分析出环境热辐射的反射偏振特性。

2.3 自身热辐射偏振 Stokes 矢量模型

当温度大于绝对零度时,物体会通过表层持续不断向外界散发热辐射。自发热辐射的强度主要受材料种类、表面粗糙度、理化结构和涂层厚度等因素的影响。物体在自发热辐射过程中同样会产生偏振效应,通过红外偏振成像系统可以在宏观层面分析物体的红外偏振特性。当不考虑热辐射穿透物体损失的能量时,根据能量守恒定律以及基尔霍夫定

律^[18]可得

$$\epsilon(\lambda, \psi_i) + R(\lambda, \psi_i) = 1, \quad (14)$$

式中: $\epsilon(\lambda, \psi_i)$ 表示物体自发热辐射。

将(14)式推广到偏振领域可得

$$\begin{cases} \epsilon_p(\lambda, \psi_i) = 1 - R_p(\lambda, \psi_i) \\ \epsilon_s(\lambda, \psi_i) = 1 - R_s(\lambda, \psi_i) \end{cases}, \quad (15)$$

式中: ϵ_s 和 ϵ_p 分别表示物体自发热辐射的垂直分量和平行分量。物体自发热辐射线偏振度可以表示^[6]为

$$M_{DOLP,E} = \left| \frac{\epsilon_s(\lambda, \psi_i) - \epsilon_p(\lambda, \psi_i)}{\epsilon_s(\lambda, \psi_i) + \epsilon_p(\lambda, \psi_i)} \right|. \quad (16)$$

将(15)、(16)式结合,线偏振度模型可变为

$$M_{DOLP,E} = \left| \frac{R_p(\lambda, \psi_i) - R_s(\lambda, \psi_i)}{2 - R_p(\lambda, \psi_i) - R_s(\lambda, \psi_i)} \right|. \quad (17)$$

由(17)式可知,物体自发热辐射线偏振度是与光波平行分量反射率和垂直分量反射率相关的函数。当物体辐射全为垂直分量反射率或平行分量反射率时,热辐射线偏振度为常数。当物体辐射的垂直分量反射率与平行分量反射率相等时,物体自发热辐射处于无偏状态。

2.4 热辐射环境下目标的红外偏振特性

红外偏振探测器接收的热辐射信息主要包括目标自发热辐射 I_E 、目标表面反射的环境热辐射 I_R 和大气散射光热辐射。由于大气散射热辐射的起偏方向具有随机性,故大气散射的热辐射对目标红外偏振效应的影响程度最小。此外,实验目标到成像器的距离很近。因此,可忽略大气热辐射的影响。当用稳定热源照射目标时,散射热辐射的强度明显增大,起偏方向虽然随机,但是仍会产生红外偏振效应,此时的环境热辐射不可忽略。对热辐射环境下的红外偏振分析模型进行优化,即探测系统只接收来自目标表面反射的环境热辐射和自发热辐射,此时的热辐射传输模型如图 3 所示。

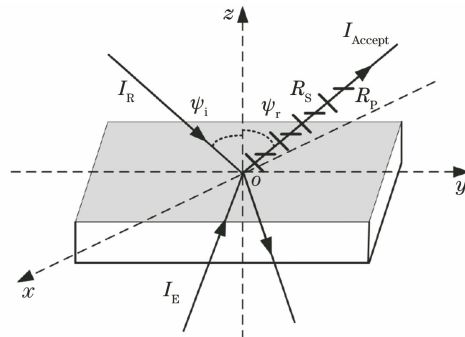


图 3 热辐射传输模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thermal radiation transfer model

进入探测器的热辐射 I_{Accept} 的表达式为

$$I_{\text{Accept}} = \epsilon(\lambda, \psi_i) I_E + R(\lambda, \psi_i) I_R. \quad (18)$$

结合偏振半球反射率公式 $R(f) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \sin \psi_r \cos \psi_r d\psi_r d\phi_r$ 、能量守恒定律

$\epsilon(\lambda, \psi_i) + R(\lambda, \psi_i) = 1$ 以及菲涅耳 Muller 矩阵, 可求出目标表面到探测器的热辐射 Stokes 矢量。当入射光为自然光时, 则

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} &= \epsilon(\lambda, \psi_i) \begin{bmatrix} I_E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\psi_i, \phi_i, \psi_r, \phi_r, \lambda) \sin \psi_r \cos \psi_r d\psi_r d\phi_r \begin{bmatrix} I_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} I_E + \frac{I_R - I_E}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin \psi_r \cdot (R_S + R_P) d\psi_r d\phi_r \\ \frac{I_R - I_E}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \cos 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_S - R_P) d\psi_r d\phi_r \\ \frac{I_R - I_E}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_P - R_S) d\psi_r d\phi_r \end{bmatrix}, \quad (19) \end{aligned}$$

式中: η_r 表示微面元法线与目标宏观表面法线之间的夹角。

为研究环境热辐射强度变化对目标红外偏振特性的影响, 定义环境热辐射强度与目标自发热辐射

强度比值为环境热辐射比 α , 其表达式为

$$\alpha = \frac{I_R}{I_E}, \quad (20)$$

此时, (19) 式可变形为

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} I_E \left\{ 1 + \frac{\alpha - 1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin \psi_r \cdot (R_S + R_P) d\psi_r d\phi_r \right\} \\ I_E \frac{\alpha - 1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \cos 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_S - R_P) d\psi_r d\phi_r \\ I_E \frac{\alpha - 1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_P - R_S) d\psi_r d\phi_r \end{bmatrix}. \quad (21)$$

根据线偏振度计算公式, 可求得热辐射环境下目标的红外线偏振度

$$\begin{aligned} M_{\text{DOLP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} &= \frac{\frac{1}{8\pi\sigma^2} |\alpha - 1|}{1 + \frac{\alpha - 1}{8\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin \psi_r \cdot (R_S + R_P) d\psi_r d\phi_r} \cdot \\ & \left\{ \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \cos 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_S - R_P) d\psi_r d\phi_r \right\}^2 + \right. \\ & \left. \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\cos^4 \psi_N} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \psi_N / (2\sigma^2)]}{\cos \psi_i} \sin 2\eta_r \cdot \sin \psi_r \cdot (R_P - R_S) d\psi_r d\phi_r \right\}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (22) \end{aligned}$$

从(22)式中可以看出, 红外偏振探测设备接收到的红外偏振信息主要与目标材质、背景的辐射强度、目标表面粗糙程度、背景辐射的入射角以及探测器位置等因素有关。

为便于偏振特性分析, 假设微面元法线与目标宏观表面法线之间的夹角较小, 且只考虑同一平面的入射和反射光线, 此时偏振度模型可简化为

$$M_{\text{DOLP, simplified}} = \frac{(\alpha - 1) \cdot |R_S - R_P|}{8\sigma^2 \cos \psi_i \pm (\alpha - 1) \cdot (R_S + R_P)}, \quad (23)$$

其中, 正负符号取决于环境热辐射比, 当 α 大于 1 时, 取正号; 当 α 小于 1 时, 取负号。简化后的偏振度模型与环境热辐射入射角、目标材质属性、目标表面粗糙度以及环境热辐射比相关。

3 目标红外偏振特性仿真

仿真条件设置为环境热辐射入射角为 45° ，目标材质为镁合金，表面粗糙度为 $2.45 \mu\text{m}$ ，空气折射率为 $n_1=1.0$ ，镁合金折射率为 $n_2=1.56+0.4i$ 。

图 4(a)反映了 R_s 和 R_p 随观测角度的变化规律。图 4(b)反映了线偏振度随观测角度的变化规律。可以看出，在环境热辐射照射到目标表面再发生反射的过程中，目标各分量反射率随观测角度的增

大而增大，且环境热辐射的垂直分量始终大于平行分量。红外线偏振度随着观测角的增大表现出先变大后变小的趋势，在入射角为 70° 附近线偏振度达到最大。

图 5(a)、(b)分别展示了自发热辐射各分量反射率和线偏振度随观测角度的变化规律。可以看出，在目标自发热辐射过程中，平行分量始终大于垂直分量。目标自发热辐射线偏振度与观测角度呈正相关，观测角度越大，线偏振度越大。

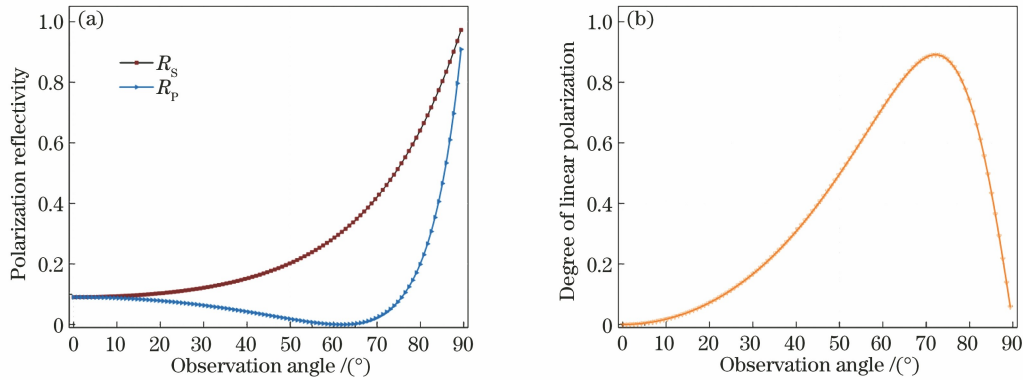


图 4 反射热辐射偏振特性。(a) R_s 和 R_p 随观测角度的变化；(b) DOLP 随观测角度的变化

Fig. 4 Polarization characteristics of reflected thermal radiation. (a) R_s and R_p varying with observation angle; (b) DOLP varying with observation angle

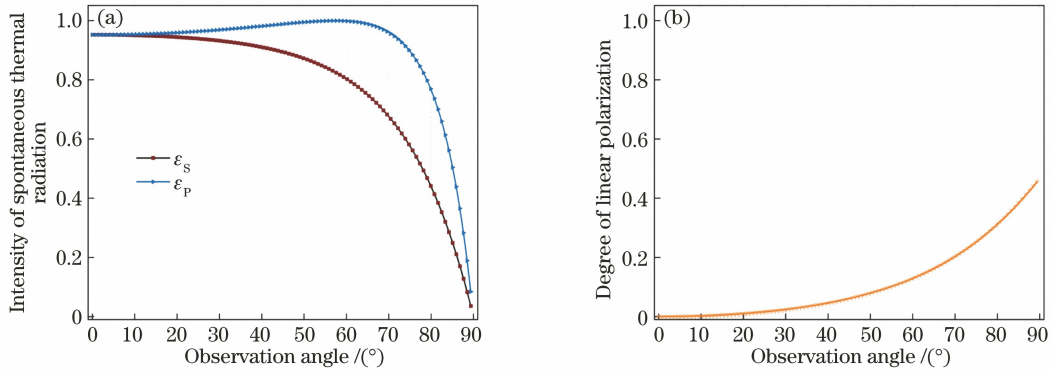


图 5 自发热辐射偏振特性。(a) ϵ_s 和 ϵ_p 随观测角度的变化；(b) DOLP 随观测角度的变化

Fig. 5 Polarization characteristics of spontaneous thermal radiation. (a) ϵ_s and ϵ_p varying with observation angle; (b) DOLP varying with observation angle

图 6(a)、(b)分别展示了环境热辐射强度小于目标自发热辐射强度时的偏振平行分量、垂直分量反射率的变化规律和环境热辐射强度大于目标自发热辐射强度时偏振平行分量、垂直分量反射率的变化规律。从图 6(a)中可以看出，当环境热辐射强度小于目标自发热辐射强度时，即环境热辐射比小于 1 时，偏振平行分量反射率始终大于偏振垂直分量反射率，各分量反射率随观测角度的变化呈现出与自发热辐射各分量相似的变化规律，即观测角度越大，各分量反射率总体上越小。此外，环境热辐射强

度越大，偏振平行分量、垂直分量反射率的差值越小，变化幅度越小。当观测角度较小时可以明显看出，环境热辐射强度越大，各分量反射率越小；当观测角度较大时，环境热辐射强度越大，各分量反射率越大。从图 6(b)中可以看出，当环境热辐射强度大于目标自发热辐射强度时，即环境热辐射比大于 1 时，偏振平行分量反射率始终小于偏振垂直分量反射率，各分量反射率随观测角度的变化呈现出与反射环境热辐射各分量反射率相似的变化规律，即随着观测角度的增大，各分量反射率总体上也增大。

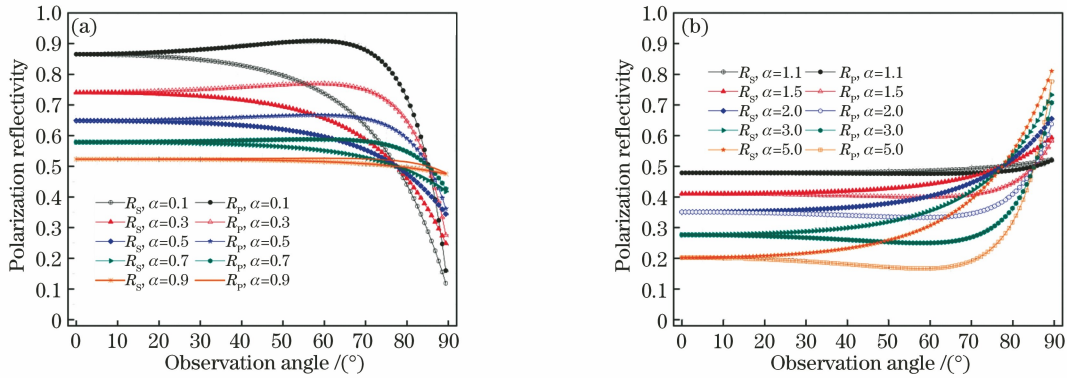


图 6 不同 α 下 R_S 和 R_P 随观测角度的变化。(a) $\alpha < 1.0$; (b) $\alpha > 1.0$

Fig. 6 R_S and R_P varying with observation angle under different α . (a) $\alpha < 1.0$; (b) $\alpha > 1.0$

环境热辐射强度越大,偏振平行分量、垂直分量反射率的差值越大,变化幅度也越大。当观测角度较小时,环境热辐射强度越大,各分量反射率越小。当观测角度较大时,环境热辐射强度越大,各分量反射率越小。

为研究环境热辐射强度变化对目标红外线偏振度的影响规律,实验基于(23)式的模型,选取环境热辐射比 α 的变化范围为 0.1~5.0,从不同观测方向

对目标红外辐射线偏振度的结果进行仿真。

图 7(a)、(b)分别为环境热辐射比 α 小于和大于 1.0 的目标红外线偏振度仿真结果。可以看出,热辐射环境下目标红外线偏振度随观测角度的增大呈先增大后减小趋势,且当观测角度为 90° 时线偏振度趋于 0。此外,当线偏振度在观测角度为 $70 \sim 80^\circ$ 范围内时可取得极大值。

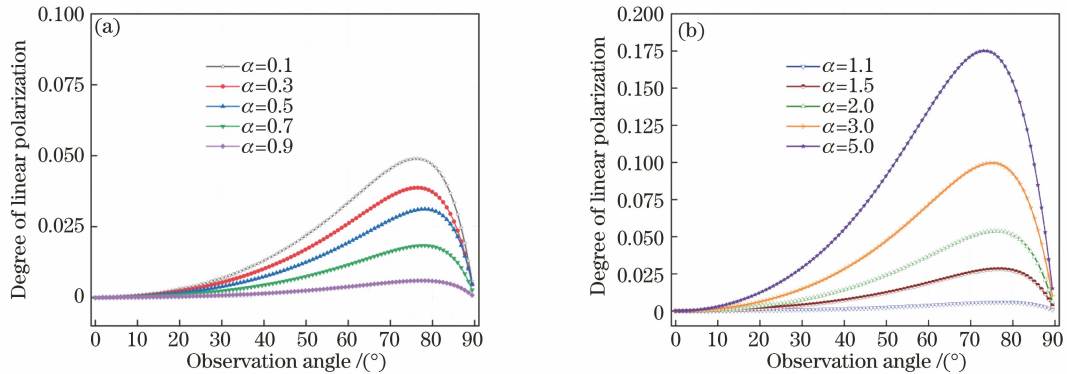


图 7 热辐射环境下目标的 DOLP 仿真结果。(a) $\alpha < 1.0$; (b) $\alpha > 1.0$

Fig. 7 Simulation results of DOLPs of target in thermal radiation environment. (a) $\alpha < 1.0$; (b) $\alpha > 1.0$

目标红外偏振度大小与观测角度和环境热辐射强度密切相关:当观测角度小于峰值观测角时,偏振度值逐渐增大,此时主要受到目标自身热辐射强度的影响,偏振平行分量与垂直分量的差值绝对值随着观测角的增大而逐渐增大,并在峰值观测角处达到最大;当观测角度大于峰值观测角且不断增大时,偏振度逐渐减小直至无偏,这主要是因为环境热辐射影响的比重在逐渐变大,此时偏振平行分量与垂直分量的差值绝对值会逐渐减小直至完全相等。

环境热辐射强度对目标红外线偏振度的影响可从偏振各分量反射率的变化角度进行解释:当环境热辐射强度小于自发热辐射强度时,随着环境热辐射强度的增大,红外线偏振度与环境热辐射强度呈

负相关,并且偏振各分量的差值绝对值与总分量的比值在减小,此时线偏振度也在减小;当环境热辐射强度大于自发热辐射强度时,随着环境热辐射强度的增大,红外线偏振度与环境热辐射强度呈正相关,并且偏振各分量的差值绝对值与总分量的比值在增大,此时线偏振度也在增大。从图 7(a)、(b)中可以看出,环境热辐射比为 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,1.1,1.5,2.0,3.0,5.0 时,它们的峰值线偏振度分别为 0.048,0.037,0.029,0.015,0.007,0.007,0.027,0.050,0.095,0.170。当环境热辐射比从 0.1 增大至 0.9 时,峰值线偏振度从 0.048 减小至 0.007,而当环境热辐射比从 1.1 增大至 5.0 时,峰值线偏振度从 0.007 增大至 0.170,这说明控制环境热辐射强度可实现对红外偏振特征强弱的调控。

4 长波红外偏振成像实验验证

为研究热辐射环境下目标红外偏振特性以及验证理论仿真结果的正确性,以镁合金板块为研究对象,在目标宏观表面上开展长波红外偏振成像实验。长波红外偏振成像系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 长波红外偏振成像系统参数

Table 1 Parameters of long wave infrared polarization imaging system

Parameter	Value
Size of camera / (mm×mm×mm)	224×180×430
Resolution / (pixel×pixel)	640×512
Wavelength range / nm	7500–14000
Detection range / m	0–8600
Polaroid dimension / (mm×mm)	50×50
Polarization extinction ratio	10000:1

为模拟稳定的热辐射环境,使用加热灯照射合金板块。利用硅橡胶加热板对合金板块进行加热和保温,以保证合金板块的自发热辐射强度不变。合金板块粗糙度约为 $2.45 \mu\text{m}$,热辐射的入射角度均为 45° ,加热管功率分别调至低热辐射 (low radiation)、中热辐射 (moderate radiation) 和高热辐射 (high radiation) 档位,作用距离为 0.5 m 。利用长波红外偏振成像系统控制电控旋转台来调整偏振片的方向,以获取相应方向的目标场景偏振数据。当合金板块自身温度为 30°C 时,实验结果如图 8 所示,其中 P_N 、 P_L 、 P_M 和 P_H 分别为无热辐射情况下的线偏振度、低热辐射情况下的线偏振度、中热辐射

情况下的线偏振度和高热辐射情况下的线偏振度。无热辐射情况、低热辐射情况、中热辐射情况和高热辐射情况下的拟合曲线如图 8 中实线所示。

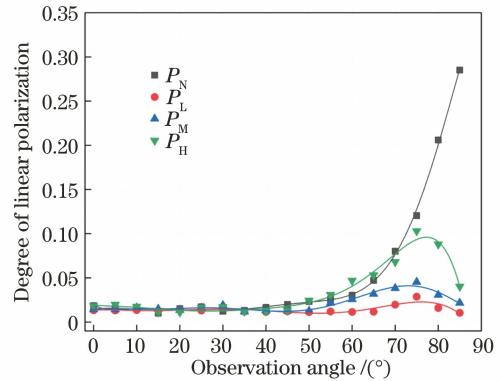


图 8 合金板块温度为 30°C 时的红外 DOLP 变化规律
Fig. 8 Change law of infrared DOLP when temperature of alloy plate is 30°C

从图 8 中可以发现,镁合金板块自发热辐射线偏振度随着观测角的增大而逐渐增大,且观测角大于 60° 时,线偏振度变化较为明显。当启用外部热源照射时,随着观测角的增大,目标表面红外线偏振度变化规律表现为先逐渐增大,当达到线偏振度峰值后迅速减小,峰值观测角大约为 75° ,实验结果与仿真结果变化规律基本一致。此外,当保持合金板块自发热辐射强度不变时,环境热辐射强度越大,线偏振度越大。当观测角度相同时,线偏振度总体呈现 $P_N > P_H > P_M > P_L$ 的规律。

为探究更多不同环境热辐射比对目标表面红外热辐射偏振特性的影响,保持外部热源不变,只调整合金板块的自发热辐射温度。利用硅橡胶加热板调控合金板块的温度,当合金板块温度为 50°C 和 70°C 时,实验结果如图 9 所示。

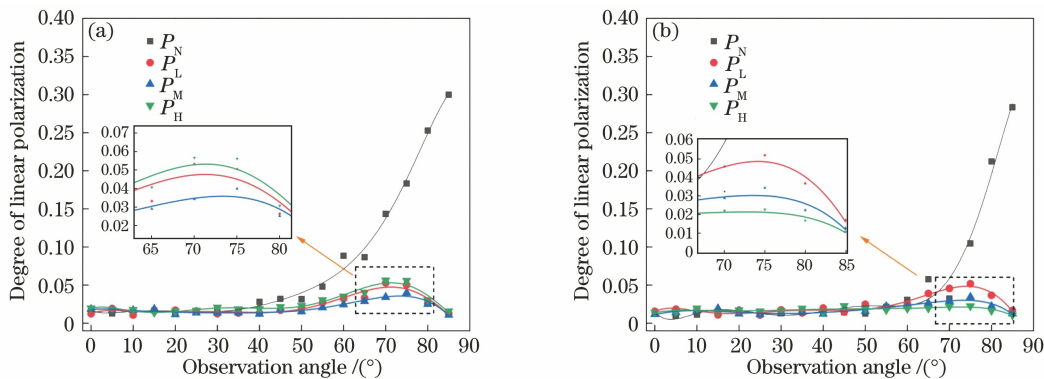


图 9 不同合金板块温度下的红外 DOLP 变化规律。(a) 50°C ; (b) 70°C

Fig. 9 Change law of infrared DOLP at different alloy plate temperatures. (a) 50°C ; (b) 70°C

图 9(a)、(b) 分别为 50°C 和 70°C 合金板块的红外线偏振度测量结果。可以看出,虽然合金板块

的辐射温度发生了较大幅度的变化,但是自发热辐射线偏振度只发生了微小波动,且变化规律一致,这

与自发热辐射线偏振度模型的分析结果相吻合。当合金板块温度为 50 °C 时,在外加环境热辐射后,目标红外线偏振度数值发生了改变,中、高热辐射下的线偏振度减小,而低热辐射下的线偏振度增大,此时中热辐射线偏振度最小,线偏振度总体呈现 $P_N > P_H > P_L > P_M$ 的规律。当合金板块温度为 70 °C 时,各组实测线偏振度大小也发生了变化,外加热辐射强度越大,红外线偏振度越小,线偏振度总体呈现 $P_N > P_L > P_M > P_H$ 的规律。

在第一组实验(合金板块温度为 30 °C)中,加热灯三种功率的热辐射强度均大于目标自发热辐射强度,此时在观测角度较大处可以显著看出,加热灯热辐射强度越大,红外线偏振度越大。在第二组实验(合金板块温度为 50 °C)中,加热灯最大功率时的热辐射强度显著大于目标自发热辐射强度,其余两种加热灯功率的热辐射强度小于目标自发热辐射强度,加热灯最大功率时的目标红外线偏振度最大,而在其余两种加热灯功率下功率越大目标红外线偏振度越小。在第三组实验(合金板块温度为 70 °C)中,加热灯三种功率的热辐射强度均小于目标自发热辐射强度,加热灯热辐射强度越大,红外线偏振度越小。三组实验表明当环境热辐射强度小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负相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越小;当环境热辐射强度大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正相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越大。

5 分析与讨论

三组实验表明,目标表面红外偏振特性与环境热辐射和目标自发热辐射有着密切关系:当环境热辐射强度小于自发热辐射强度时,目标表面红外线偏振度与环境热辐射强度呈负相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越小;当环境热辐射强度大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正相关,即环境热辐射强度越大,红外线偏振度越大。从热辐射环境下的目标红外线偏振度模型可知,红外线偏振度与环境热辐射强度表现出了正相关或负相关的变化规律,数值上表现为环境热辐射强度与目标自发热辐射强度的差值绝对值即环境热辐射比与 1 的差值绝对值($|\alpha - 1|$)。

在长波红外偏振成像实验中,当观测角度较小时,红外线偏振度并未等于 0,而是略大于 0,且线偏振度峰值提前,即仿真结果和实验结果不完全吻合,

这是建模过程中忽略目标表面的漫反射效应造成的。在实验过程中,为研究环境热辐射比对目标红外线偏振度的影响,在环境热辐射强度不变的情况下,改变了目标的自发辐射温度(30, 50, 70 °C)。由维恩位移定律可知,当目标温度为 30~70 °C 时,目标辐射波长仍在探测器接收范围内。此外,镁合金目标的表面粗糙度约为 2.45 μm ,此时辐射波长变动对实验结果的影响很小。因此,可认为实验过程中合金板块温度的改变只对自发热辐射强度造成了影响,且该影响可忽略。

在光电防护领域中,为更好实现目标与背景融为一体为目的,以达到红外偏振隐身伪装的效果,可通过外加热辐射的方式来改变目标表面热辐射偏振特性。根据不同的背景环境,通过调整环境热辐射强度和自发热辐射强度的比值可以实现偏振特征的增强或减弱,进而可以干扰敌方的偏振探测侦察,但这同样带来了其他问题,如随着红外辐射强度的增强,被红外探测发现的可能性在增大。此外,若要验证偏振特性模型的拟合度,需对环境热辐射比 α 进行测量计算。

6 结 论

对热辐射环境下目标红外偏振特性进行了研究。首先,推导了基于双向反射分布函数的反射环境热辐射线偏振度模型和目标自发热辐射线偏振度模型。然后,推导了热辐射环境下的目标红外线偏振度模型,并对所提的三种模型进行了数值仿真。仿真结果表明,目标自发热辐射强度和环境热辐射强度与目标红外偏振特性有着密切的联系。改变目标自发热辐射强度和环境热辐射强度的比值能够增强或减弱目标红外偏振特征。从不同的观测天顶角对目标进行探测可获得不同的线偏振度且线偏振度峰值在 70°~80°观测角区间内。最后,利用长波红外偏振成像系统对仿真结果进行了验证,发现实验结果与仿真结果基本吻合,表明了所提理论模型的正确性。该研究成果可以为复杂环境下目标红外偏振特性分析工作的开展与研究提供有效参考。

参 考 文 献

- [1] Hu H F, Li J Q, Li X B, et al. Underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41 (3): 0329001.
胡浩丰, 李嘉琦, 李校博, 等. 三自由度偏振差分水
下成像技术[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0329001.

- [2] Liu F, Sun S J, Han P L, et al. Development of underwater polarization imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0600001.
刘飞, 孙少杰, 韩平丽, 等. 水下偏振成像技术研究及进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0600001.
- [3] 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.
- [4] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the MWIR: a method to improve target acquisition [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5783: 653-661.
- [5] Duan J, Fu Q, Mo C H, et al. Review of polarization imaging for international military application [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8908: 276-281.
- [6] Woolley M, Michalson J, Romano J. Observations on the polarimetric imagery collection experiment database [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8160: 229-244.
- [7] Bowers D L, Boger J K, Wellems D, et al. Unpolarized calibration and nonuniformity correction for long-wave infrared microgrid imaging polarimeters [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(4): 046403.
- [8] Wolff L B, Lundberg A, Tang R. Image understanding from thermal emission polarization [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 25-25, 1998, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 625-631.
- [9] Gurton K P, Dahmani R, Videen G. Measured degree of infrared polarization for a variety of thermal emitting surfaces [R]. Adelphi: Army Research Laboratory, 2004.
- [10] Gurton K P, Dahmani R. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5361-5367.
- [11] Chen W L, Wang S H, Jin W Q, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(5): 507-514.
陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 507-514.
- [12] 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.
- [13] Liu Y, Shi H D, Jiang H L, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471.
柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究 [J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 459-471.
- [14] Liu Y L, Zhao H B, Yu X J, et al. Dual channel snapshot computation spectral polarization imaging method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 143601.
刘彦丽, 赵海博, 于晓杰, 等. 双通道快照式计算光谱偏振成像方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(14): 143601.
- [15] Mou Y, Sheng X Q, Gao Y Q, et al. Bidirectional reflection distribution function modeling (BRDF) for terahertz diffuse scattering analysis of dielectric rough targets [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 171-179.
- [16] Nicodemus F E. Comment on "current definitions of reflectance" [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 283-285.
- [17] Priest R G, Gerner T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements [R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 2000.
- [18] Dong J, Zhang W J, Liu L H. Electromagnetic scattering, absorption and thermal emission by clusters of randomly distributed magneto-optical nanoparticles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 255: 107279.