

伪装涂层红外偏振模型优化及辐射特性研究

于洁, 巩蕾*, 王海斌, 王利国, 杨利红, 李瑶, 阳志强

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 为了表征伪装涂层表面的辐射偏振特性,以 Priest Germer(P-G)模型为基础,针对镜面反射和漫反射,建立一种基于几何衰减效应的二分量偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型,引入镜面反射系数和漫反射系数,推导出红外辐射线偏振度模型,并对此模型进行校验,结果与实验数据吻合较好。数值分析涂层表面粗糙度、几何衰减效应及漫反射效应对红外线偏振度的影响,结果表明,涂层表面粗糙度越大,由粗糙度引起的遮蔽阴影效应越明显,对应涂层的红外线偏振度越小,且目标涂层的环境辐射与其红外线偏振度呈负相关。上述结果为实现军事伪装和反伪装、目标识别等提供了理论支撑和技术支持。

关键词 激光光学; 红外偏振; 几何衰减效应; 漫反射效应; 偏振双向反射分布函数; 伪装涂层

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221016

1 引言

随着光电探测技术的不断发展,红外偏振技术在目标识别等方面的优势凸显,在隐身与反隐身及军事伪装领域得到了广泛应用。目标表面涂覆不同涂层后会表现出不同的偏振光辐射特性,能够为红外伪装目标识别提供更加丰富的多维重要信息^[1]。

在红外波段,由于目标具有显著的偏振辐射特性,因此通过对目标的红外偏振探测可以更准确地识别伪装目标;反之,通过在目标表面涂覆减偏涂层,亦可有效减弱其偏振特性,从而实现目标伪装。

红外偏振特性研究的关键之一是偏振建模,因此目标涂层的红外偏振特性建模受到国内外学者的广泛关注。陈伟力等^[2]基于 Torrance-Sparrow(T-S)偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型,推导出红外偏振辐射斯托克斯矩阵,并进一步简化偏振度和偏振角模型;杨志勇等^[3]基于 Priest Germer(P-G)模型推导出红外线偏振度(DOLP)模型,分析了环境热辐射对目标红外偏振特性的影响。但以上均未考虑遮蔽效应的影响。杨敏等^[4]考虑遮蔽函数的作用,对体散射分量建模,提出了多参量 pBRDF 模型,并对 1.06 μm 涂层表面偏振特性进行分析;汪方斌等^[5]针对 Blinn 遮蔽效应,建立了镜面反射、漫反射和体散射三分量 pBRDF 模型,研究了目标表面的偏振特性;Hyde 等^[6]考虑遮蔽效应和朗伯漫反射,在 Priest Germer 模型基础上,建立了更加精准的目标表面

pBRDF 模型;Zhan 等^[7]基于 Kubelka-Munk 理论修正 pBRDF 模型,并推导出偏振度模型。以上研究中的遮蔽函数模型主要采用 Blinn 简化遮蔽模型,遮蔽函数模型有待优化,精度有待提升。众所周知,伪装涂层表面并非光滑,且相邻面元之间在不同的遮蔽效应。而 Blinn 遮蔽模型近似认为相邻面元之间的夹角相等,与实际粗糙面情形不符,急需针对更贴合实际情况的遮蔽效应粗糙伪装涂层展开研究。尤其是长红外波段的涂层偏振特性研究尚处于初级阶段,有待进一步深入。

本文基于 P-G 模型,采用改进的几何衰减模型,结合镜面反射和漫反射效应,提出基于几何衰减效应的二分量 pBRDF 模型;基于 Stokes 矩阵,推导出红外辐射线偏振度模型,分析伪装涂层表面的红外偏振辐射特性,进一步分析涂层表面粗糙度、几何衰减效应和漫反射效应对其红外偏振特性的影响。研究结果为典型军事目标伪装和反伪装、隐身等领域提供了有力的理论依据和技术支撑。

2 理论基础

2.1 偏振双向反射分布函数

通过建立涂层表面的 pBRDF 模型,表征涂层偏振光辐射特性。Priest 等^[8]于 2000 年首次提出偏振双向反射分布函数模型,简称为 P-G 模型。根据电磁场理论,将 T-S BRDF 模型与 4×4 的 Muller 相结合得到 P-G 模型。其中,T-S BRDF 的表达式为

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-07-28; 录用日期: 2022-08-08; 网络首发日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(62071359, 61905187, 62001364)、陕西省教育厅重点科研计划(20JS059)、西安工业大学校长基金面上培育项目(XGPY200206)

通信作者: *gonglei@xatu.edu.cn

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{4\sigma^2} \cdot \frac{1}{\cos^4 \alpha} \cdot \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos \theta_i \cos \theta_r}, \quad (1)$$

式中: σ 表示涂层表面粗糙度; α 表示微面元法线 Z_μ 与涂层表面法线 Z 之间的夹角; θ_i 和 θ_r 分别表示入射方向、反射方向与涂层表面法线的夹角; φ_i 和 φ_r 分别表示入射方位角和观测方位角。具体如图 1 所示。

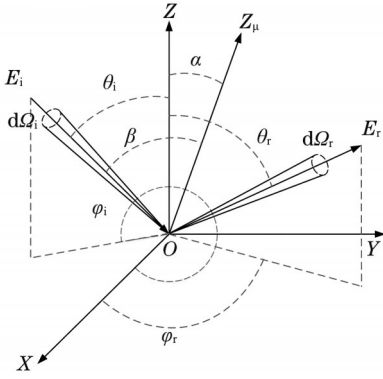


图 1 微面元模型示意图

Fig. 1 Schematic of micro-surface metamodel

由几何关系知,各角度之间存在以下关系:

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

$$\begin{aligned} \cos(2\beta) &= \cos(\theta_i) \cos(\theta_r) + \\ \sin(\theta_i) \sin(\theta_r) \cos(\varphi_r - \varphi_i). \end{aligned} \quad (3)$$

Jones 矩阵偏振化表达式为

$$J = \begin{bmatrix} J_{ss} & J_{ps} \\ J_{sp} & J_{pp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_r) & \sin(\eta_r) \\ -\sin(\eta_r) & \cos(\eta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\eta_i) & -\sin(\eta_i) \\ \sin(\eta_i) & \cos(\eta_i) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: R_s 和 R_p 分别为菲涅耳反射率的垂直分量和平行分量; η_i 和 η_r 为坐标旋转角,与微面元中的 θ_i 、 θ_r 、 β 之间满足如下关系:

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

$$\cos(\eta_r) = \frac{[(\cos \theta_i + \cos \theta_r) / (2\cos \beta) - \cos \theta_r \cos \beta]}{(\sin \theta_r \sin \beta)}. \quad (6)$$

Jones 与 Muller 部分矩阵元之间的关系^[6]如下:

$$\begin{cases} M_{00} = \frac{1}{2} (|J_{ss}|^2 + |J_{sp}|^2 + |J_{ps}|^2 + |J_{pp}|^2) \\ M_{10} = \frac{1}{2} (|J_{ss}|^2 - |J_{sp}|^2 + |J_{ps}|^2 - |J_{pp}|^2) \\ M_{20} = \frac{1}{2} (J_{ss}J_{sp}^* + \text{c. c.} + J_{ps}J_{pp}^* + \text{c. c.}) \end{cases} \quad (7)$$

Muller 矩阵与 T-S BRDF 模型作用得到全偏振 pBRDF 模型,即 P-G 模型表达式为

$$f_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{8\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha \cos \theta_i \cos \theta_r} M_{jk}^s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r), \quad (8)$$

式中: $j=0, 1, 2, 3$; $k=0, 1, 2, 3$; $M_{jk}^s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为镜面反射 Muller 矩阵元。

但是, P-G 模型仅考虑了镜面反射过程中的偏振特性,忽略了光与物质相互作用中漫反射部分的偏振效应,同时没有考虑相邻面元之间的遮挡和阴影效应,因此,需要对模型进一步优化。

2.2 基于几何衰减效应的二分量 pBRDF 建模

涂层表面越粗糙,遮蔽效应越明显,进而遮蔽效应对涂层表面散射及辐射特性产生的影响越明显,因此,建立涂层表面 pBRDF 模型时,遮蔽效应的影响不可忽视^[9]。目前采用的遮蔽函数模型均是 Blinn 简化模型,其假设的等腰 V 形结构与实际的表面特征不符,存在一定的局限性。基于此,本文采用刘宏等^[10]提出的改进几何衰减模型,建立优化的 pBRDF 模型。改进的几何衰减模型是根据角度动态调控考虑遮蔽效应和阴影效应,即当入射角过大时,阴影效应占主导;当反射角过大时,遮蔽效应占主导;当入射角为中间角度时,两者均会对光场能量产生衰减作用。遮蔽效应和阴影效应的影响如图 2 所示。

由于阴影效应和遮蔽效应均会对反射光产生衰减作用,因此将二者统称为几何衰减效应并取二者最小值,即改进的几何衰减模型表达式为

$$G(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \min(G_s, G_m), \quad (9)$$

式中: G_s 表示阴影函数模型; G_m 表示遮蔽函数模型,具体见参考文献^[10]。

根据上述理论分析,将改进的几何衰减模型与 Blinn 简化模型进行对比,其中观测天顶角为 60° ,表面粗糙度 $\sigma=0.3$ 。由图 3 可知,改进后的几何衰减模型有效消除了 Blinn 模型存在的尖锐拐点(如图 3 中圈圈所示),保证 pBRDF 曲线在大反射角情况下不会出现过大幅值,同时考虑了表面粗糙度的影响,模型更加贴合实际。

由微面元理论知,涂层表面的一系列微小面元遵循菲涅耳反射定律,光与物质相互作用后出现镜面反射和漫反射,分析影响涂层偏振特性的因素时,两部分作用均须考虑。由于 Minnaert 模型可有效模拟表面反射系数随角度变化的情况,故漫反射偏振模型采用 Minnaert 模型^[11]:

$$f_d = \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^C \cdot M_{jk}^d, \quad (10)$$

式中: k_d 为漫反射系数; C 为待定系数,范围是 $(-1, 0)$; M_{jk}^d 为漫反射 Muller 矩阵元。漫反射对反射和辐射均

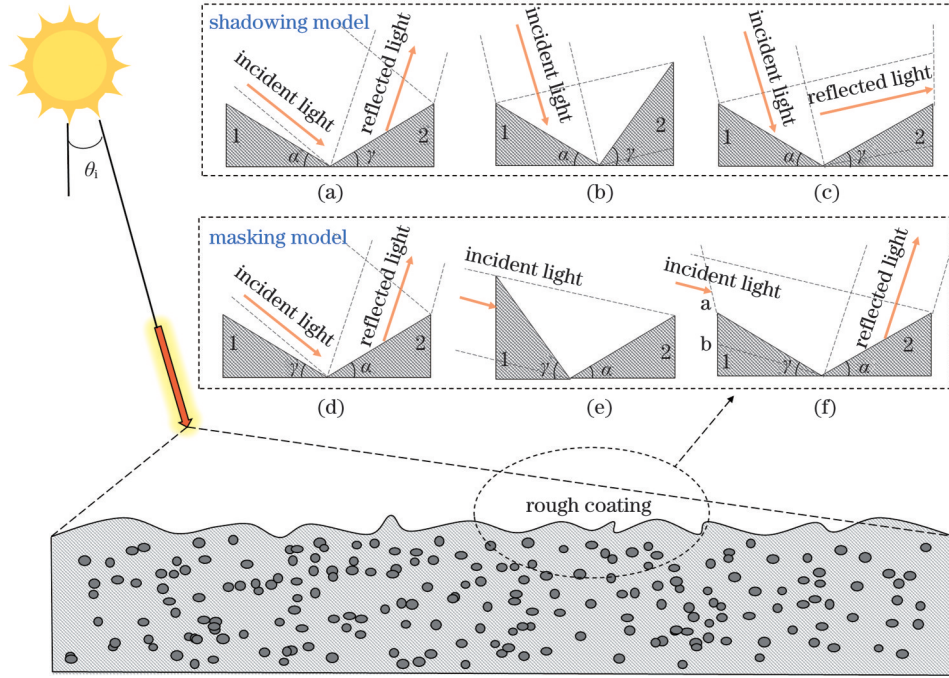


图 2 涂层的遮蔽阴影模型。(a)全通过阴影模型；(b)完全阴影模型；(c)半通过半阴影模型；(d)全通过遮蔽模型；(e)完全遮蔽模型；(f)半通过半遮蔽模型

Fig. 2 Shadowing and masking models of coating. (a) Passing shadowing model; (b) full shadowing model; (c) half-through semi-shadowing model; (d) passing masking model; (e) full masking model; (f) half-through semi-masking model

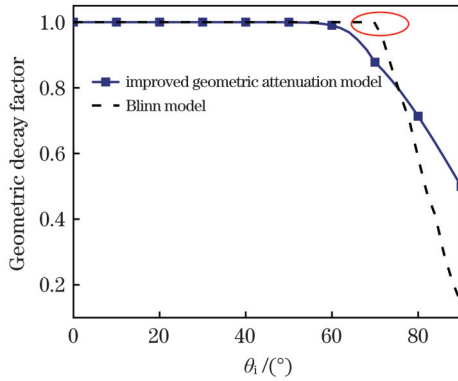


图 3 改进的几何衰减模型与 Blinn 模型的对比如图

Fig. 3 Comparison of improved geometric attenuation model with Blinn model

有一定的影响,其对应的 Muller 矩阵中的 $M_{00}^d=1$, 其余的元素为 $0^{[12]}$ 。

基于伪装涂层表面粗糙度引起的几何衰减效应和漫反射效应,引入镜面反射系数和漫反射系数,建立基于几何衰减效应的二分量 pBRDF 模型:

$$F_{jk} = \frac{k_s \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right) \cdot G(\theta_i, \theta_r, \sigma)}{8\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha \cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot M_{jk}^s + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^C \cdot M_{jk}^d, \quad (11)$$

式中: k_s 为镜面反射系数。

2.3 伪装涂层红外辐射线偏振度推导及分析

由于涂层红外辐射的偏振度可以等价于偏振光的发射率,涂层的辐射发射率与被测面的方向半球反射率有关,半球反射率为涂层表面半球上的反射辐射通量与入射辐射通量的比值,表达式为

$$\rho_{DHR}(\theta_i, \varphi_i) = \int_{\Omega_r} F_{jk}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{jk}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r, \quad (12)$$

式中: Ω_r 为反射方向的立体角。

根据几何衰减效应的二分量 pBRDF 模型和 Stokes 矢量法,入射辐射的 Stokes 矢量 S^i 与反射辐射的 Stokes 矢量 S^r 的传输关系为

$$\begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int F_{00} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{01} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{02} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{03} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int F_{10} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{11} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{12} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{13} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int F_{20} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{21} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{22} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{23} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int F_{30} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{31} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{32} \cos \theta_r d\Omega_r & \int F_{33} \cos \theta_r d\Omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $S_0^i, S_1^i, S_2^i, S_3^i$ 为 S^i 的矩阵元; $S_0^e, S_1^e, S_2^e, S_3^e$ 为 S^e 的矩阵元。

红外辐射偏振特性包括自发辐射和反射辐射, 根据红外偏振成像原理, 入射到红外偏振片前的 Stokes 矢量为 S^r 与自发辐射矢量 S^e 之和, 可表示为

$$S = S^r + S^e = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{jk}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega_r \cdot S^i + \varepsilon(\lambda, \theta_i) \cdot I_e, \quad (14)$$

式中: I_e 为涂层自发辐射强度矩阵; $\varepsilon(\lambda, \theta_i)$ 为涂层红外偏振辐射率, 其中 λ 为波长。通常认为红外成像系统中的入射光为自然光, $S^i = [I_{bg} \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 即式(14)可表示为

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F_{jk}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega_r \begin{bmatrix} I_{bg} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \varepsilon(\lambda, \theta_i) \begin{bmatrix} I_e \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: I_{bg} 为涂层的环境辐射强度; I_e 为涂层自发辐射强度。

由 Stokes 原理可知, S_3 表示的是圆偏振分量, 圆偏振分量通常较小, 故忽略不计。基于半球反射率表达式及红外成像原理可得

$$S = \begin{bmatrix} I_e + \frac{I_{bg} - I_e}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{k_s \exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} G(\theta_i, \theta_r, \sigma) (R_s + R_p) + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c M_{jk}^d \right\} d\Omega_r \\ \frac{I_{bg} - I_e}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{k_s \exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} G(\theta_i, \theta_r, \sigma) \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c M_{jk}^d \right\} d\Omega_r \\ \frac{I_{bg} - I_e}{16\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{k_s \exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} G(\theta_i, \theta_r, \sigma) \sin(2\eta_i) (R_s - R_p) + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c M_{jk}^d \right\} d\Omega_r \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

为研究环境辐射对涂层表面偏振特性的影响, 定义环境辐射比, 即环境辐射强度与自发辐射强度的比值, 用 γ 表示为

$$\gamma = \frac{I_{bg}}{I_e}. \quad (17)$$

结合式(15)、(16)可推导出线偏振度模型为

$$D_o = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \frac{\frac{k_s}{16\pi\sigma^2} \cdot (\gamma - 1)}{1 + \frac{(\gamma - 1)}{16\pi\sigma^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)] G(\theta_i, \theta_r, \sigma) (R_s + R_p)}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \cdot M_{jk}^d \right\} \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r} \cdot \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} \cos 2\eta_r (R_s - R_p) \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r \right]^2 + \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos^4 \alpha \cos \theta_i} \sin 2\eta_r (R_s - R_p) \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r \right]^2. \quad (18)$$

3 数值计算

3.1 方法有效性验证

为验证本文提出的伪装涂层红外线偏振度模型的有效性, 将数值计算结果与参考文献[13]中的实验数据进行对比。本文数值计算使用的是波长均为 $10.6 \mu\text{m}$ 的长波红外, 选择的材料为黑漆, 折射率为 1.426, 粗糙度 $\sigma=0.134$, $\gamma=0.1$, $k_s=0.562$, $k_i=0.4$, 观测天顶角为 60° , 数值计算了黑漆 D_o 随入射天顶角的变化情况, 图4为黑漆红外线偏振度数值计算结果与实验数据的对比图。为了准确对比实验数据与数值计算的吻合程度, 将两者进行线性拟合, 得到图4中的拟合曲线。当拟合曲线斜率为 1 时, 则表示两者高

度吻合。图4的拟合曲线斜率为 0.9924, 表明本文的模型数值计算结果(圆圈曲线)与参考文献[13]的实验数据(三角散点)吻合较好。同时验证了模型的有效性, 为后续数值计算及理论分析提供了支撑。

为进一步验证本文模型的精度, 将本文数值计算结果与参考文献[13]的仿真实验数据进行对比。如图5所示, 本文数值计算值(圆圈曲线)与参考文献[13]实验数据(三角散点)的最大误差为 0.0134, 参考文献[13]的数值计算值与实验数据的最大误差为 0.0374。且本文数据的均方根误差(RMSE)为 0.000522, 参考文献[13]的 RMSE 为 0.00147。通过两组数据对比可知, 本文数值计算结果的最大误差和 RMSE 值均较小, 相比参考文献[13]的数据, RMSE

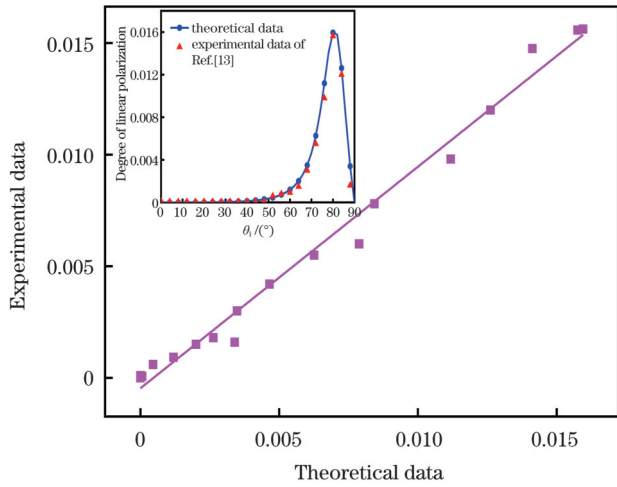


图 4 黑漆红外线偏振度数值计算结果与实验数据的对比
Fig. 4 Comparison between numerical calculation result and experimental data for infrared DOLP of black paint

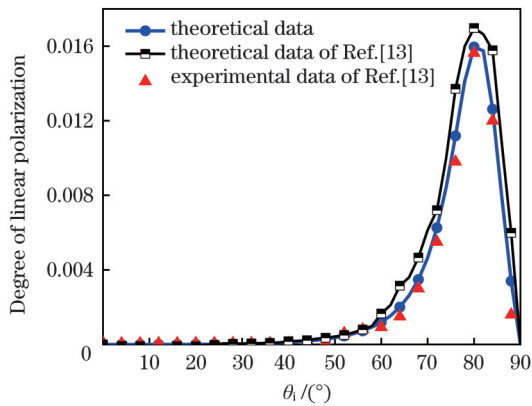


图 5 黑漆红外线偏振度数值计算结果与参考文献[13]数据的对比
Fig. 5 Comparison between numerical calculation result and data of reference [13] for infrared DOLP of black paint

值下降了 64.5%，表明模型的数值结果与实验值吻合较好。

3.2 伪装涂层表面粗糙度、几何衰减效应及漫反射效应对其红外线偏振度的影响

由文中 2.2、2.3 节可知，涂层表面的粗糙度、几何衰减效应和漫反射效应均为影响红外偏振的重要因素之一。涂层表面粗糙度越大，几何衰减效应和漫反射效应越明显，其红外线偏振度越低。

数值计算了不同入射角下表面粗糙度分别为 $\sigma=0.2, 0.6, 0.8$ 的绿漆的红外线偏振度。其中，绿漆的折射率为 1.125, $\gamma=0.1, k_s=0.468, k_d=0.4$ 。根据图 6 分析知，对于绿漆，随着 σ 的增大，其红外线偏振度减小，峰值处的线偏振度差值最大，即涂层的红外线偏振度随着其粗糙度的增大而减小。伪装涂层表面的粗糙度增大形成了遮蔽和阴影效应及漫反射效应，使得部分偏振光被遮挡或减弱，从而导致其红外线偏振度下降。由此可知，伪装涂层的表面粗糙度与其红外线偏振度

成反比，即涂层表面粗糙度越大，红外线偏振度越小，红外目标伪装效果越好。

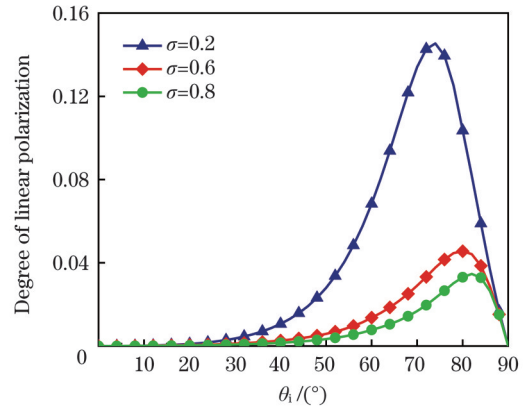


图 6 不同粗糙度下绿漆的线偏振度随入射角的变化
Fig. 6 DOLP of green paint versus angle of incidence under different roughnesses

图 7(a)、(b) 分别给出了黑漆和绿漆在不同因素下的线偏振度随入射角变化的曲线图。其中，黑漆和绿漆的粗糙度均为 0.2，两者其余参数同 3.1、3.2 节所述。与图 7(a)、(b) 方块曲线相比，考虑几何衰减因子时，如图 7(a)、(b) 圆圈曲线所示，黑漆和绿漆的红外线偏振度值均较低，尤其在大入射角时较为明显，由此可见几何衰减因子对涂层的影响主要发生在大入射角情况下，且几何衰减效应导致圆圈曲线对应的线偏振度比方块曲线低。由 2.2 节可知，在大入射角情况下存在阴影效应，其导致偏振光在传输的过程中存在部分衰减，从而导致线偏振度值降低。除了几何衰减效应，由涂层表面粗糙度引起的漫反射效应亦会导致部分偏振光特性减弱。基于此分别对考虑漫反射前、后涂层的红外线偏振度进行计算。与图 7(a)、(b) 圆圈曲线相比，考虑漫反射后，如图 7(a)、(b) 三角曲线所示，黑漆和绿漆的红外线偏振度值整体呈减小趋势，这与漫反射效应和线偏振度呈负相关的结论一致^[14]；同时漫反射效应对不同入射角时的红外线偏振度均有影响，使得在不同入射角情况下三角曲线对应的线偏振度值均低于圆圈曲线。同时，对比黑漆和绿漆的红外线偏振度值可知，在相同条件下，黑漆的红外线偏振度高于绿漆。黑漆和绿漆在不同条件下的红外线偏振度峰值均保持在 $70^\circ \sim 80^\circ$ 范围内。

3.3 环境辐射对伪装涂层红外线偏振度的影响

通过调整涂层与背景环境的红外热辐射特性，可进一步改善目标的伪装效果。接下来分别对不同 γ 下涂层的红外线偏振度进行仿真。其中黑漆的数值计算参数同 3.1 节所述。图 8 为黑漆在不同辐射环境下的线偏振度与入射角的关系。由图 8(a) 可知，当 $\gamma < 1$ 时，环境辐射小于自发热辐射，即以自发辐射为主， γ 越小，黑漆线偏振度就越大；由图 8(b) 可知，当 $\gamma > 1$

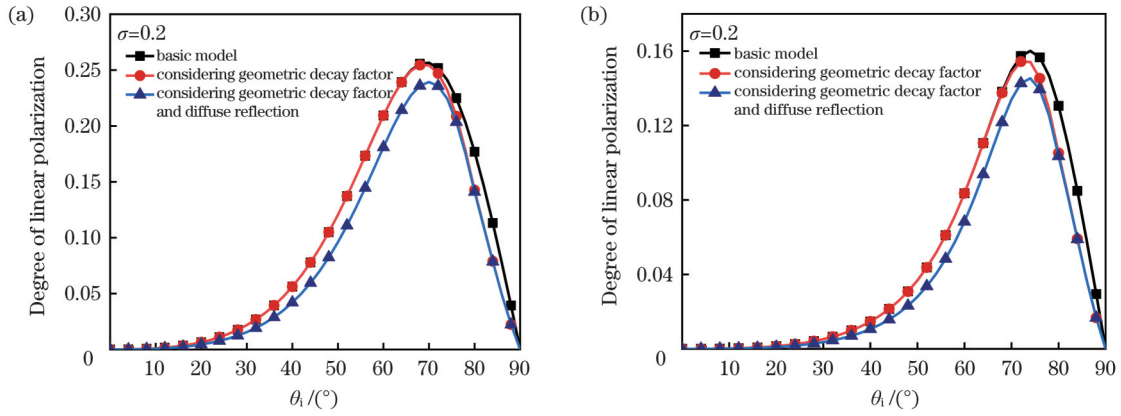
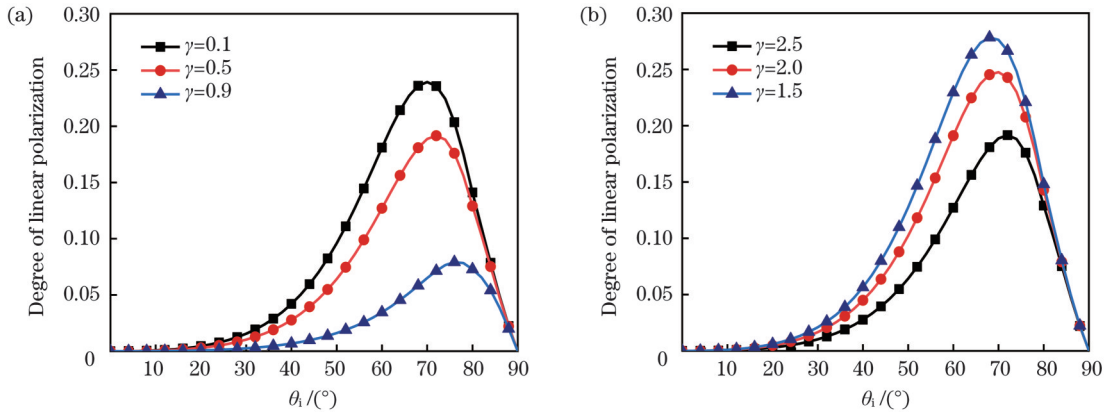


图 7 不同影响因素下黑漆和绿漆的红外线偏振度。(a)黑漆;(b)绿漆

Fig. 7 Infrared DOLPs of black paint and green paint under different influencing factors. (a) Black paint; (b) green paint

图 8 不同 γ 下黑漆的线偏振度与入射角的关系。(a) $\gamma < 1$; (b) $\gamma > 1$ Fig. 8 DOLP of black paint versus angle of incidence under different γ . (a) $\gamma < 1$; (b) $\gamma > 1$

时,环境辐射大于自发热辐射,即以环境辐射为主, γ 越大,黑漆线偏振度就越小。对于黑漆涂层,其自发热辐射强度与线偏振度成正比,自发热辐射强度越大,线偏振度就越大;涂层的环境热辐射强度与线偏振度成反比,环境热辐射强度越大,线偏振度就越小。由上述分析可知,在不同环境辐射条件下,涂层的红外线偏振度不同。

4 结 论

根据微面元理论、菲涅耳Muller矩阵,考虑几何衰减效应及漫反射效应,提出了基于几何衰减效应的二分量pBRDF模型。基于Stokes矩阵,推导出伪装涂层的红外辐射线偏振度模型,并对影响伪装涂层红外偏振特性的因素进行了数值计算。结果表明:采用的几何衰减模型能有效消除Blinn模型中存在的尖锐拐点,保证模型在大入射角下不会出现较大幅值,模型更精确;考虑几何衰减效应后,线偏振度的计算结果与实验数据更加吻合。涂层表面粗糙度越大,红外线偏振度越小;几何衰减效应越明显,涂层的红外线偏振度越小;漫反射效应与涂层红外线偏振度呈负相关。在不同入射天顶角下得到不同的线偏振度,伪装涂层的线偏振度峰值均出现在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 区间。以上结论为伪装涂层在红外偏

振隐身及反隐身方面的应用提供了理论支撑。

鉴于理论和篇幅的局限性,未同时考虑体/面散射对红外涂层表面偏振辐射特性的影响,后续将基于体/面复合辐射建模进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 冯巍巍,魏庆农,汪世美,等.涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J].光学学报,2008,28(2):290-294.
Feng W W, Wei Q N, Wang S M, et al. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 290-294.
- [2] 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.
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.
- [3] 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):0220001.
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): 0220001.
- [4] 杨敏,方勇华,吴军,等.基于Kubelka-Munk理论的涂层表面多参量偏振双向反射分布函数模型[J].光学学报,2018,38(1):0126002.
Yang M, Fang Y H, Wu J, et al. Multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces based on Kubelka-Munk theory[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0126002.

- [5] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1129002.
Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1129002.
- [6] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 22138-22153.
- [7] Zhan H Y, Voelz D G. Modified polarimetric bidirectional reflectance distribution function with diffuse scattering: surface parameter estimation[J]. Optical Engineering, 2016, 55(12): 123103.
- [8] Priest R G, Germer T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements[C] // Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors, March 21-23, 2000, Undefined. Gaithersburg: NIST, 2000: 169-181.
- [9] 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.
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.
- [10] 刘宏, 朱京平, 王凯. 基于随机表面微面元理论的二向反射分布函数几何衰减因子修正[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184213.
Liu H, Zhu J P, Wang K. Modification of geometrical attenuation factor of bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184213.
- [11] 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
Yang Y F, Wu Z S, Cao Y H. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0229001.
- [12] 朱达荣, 冯康康, 汪方斌, 等. 粗糙表面六参量偏振双向反射分布函数模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 092901.
Zhu D R, Feng K K, Wang F B, et al. Six-parameter polarized bidirectional reflectance distribution function model for rough surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 092901.
- [13] 谢建. 典型目标的红外偏振特性仿真方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 51-73.
Xie J. Simulation and analysis method of infrared polarization characteristics of typical targets[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 51-73.
- [14] 颀孙晓博, 武文远, 黄雁华, 等. 基于MB模型的简化偏振BRDF模型建立与仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1098-1102.
Zhuansun X B, Wu W Y, Huang Y H, et al. Establishment and simulation of simplified polarimetric BRDF model based on MB model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 1098-1102.

Optimization of Infrared Polarization Model and Study of Radiation Characteristics of Camouflaged Coatings

Yu Jie, Gong Lei*, Wang Haibin, Wang Liguu, Yang Lihong, Li Yao, Yang Zhiqiang
School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract

Objective With the continuing development of photoelectric detection technology, infrared polarization technology offers significant advantages, such as cloud penetration and target recognition. Infrared polarization technology has been widely used in stealth, anti-stealth, and military camouflage. The camouflaged target may be more accurately detected using infrared polarization detection since it shows substantial polarization radiation features in the infrared range. In contrast, coating the surface with a depolarization coating can effectively diminish its polarization characteristics, thereby creating a target camouflage. Therefore, investigating the characteristic polarization modeling of camouflage coatings can aid in the effective generation of camouflage and anti-camouflage for the target. Most of the shading functions utilized in the current polarization bidirectional reflectance distribution function (pBRDF) are blind simplified models that do not correspond to the actual rough surface elements. Consequently, it is necessary to conduct shading function research consistent with the real scenario. Research on the polarization characteristics of coatings in the extended infrared band, in particular, is still in its infancy and requires further investigation.

Methods In this work, an improved shading function model is adopted, and the specular reflection coefficient and diffuse reflection coefficient are introduced to characterize the polarized radiation characteristics of the camouflage coating surface using the Priest-Germer (P-G) model. A two-component pBRDF optimization model is established, and a linear polarization degree model of infrared radiation is derived. The numerical calculation results of the model are compared with the experimental data, and the effects of the surface roughness, geometric attenuation, and diffuse reflection on the infrared polarization degree of the coating surface are analyzed numerically. Additionally, the effect of environmental radiation on the infrared polarization characteristics of the coating is analyzed.

Results and Discussions The numerical results of the proposed infrared polarization model are compared with the experimental data, and the slope of the curve after linear fitting is 0.9924 (Fig. 4). The linear polarization degree model reflecting the geometric attenuation and diffuse reflection effects is analyzed. The results show that the larger the surface roughness of the coating, the smaller the infrared polarization degree (Fig. 6). The more significant the geometric attenuation and diffuse reflection effects, the lower the infrared polarization degree of the coating (Fig. 7). When the ambient radiation ratio is less than 1, that is, when the spontaneous radiation is dominant, the lower the ambient radiation ratio, the higher the degree of linear polarization of the coating. When the ambient radiation ratio is higher than 1, the ambient radiation becomes dominant, and the higher the ratio, the lower the degree of linear polarization of the coating (Fig. 8). When the ratio of the coating radiation intensity to the background radiation intensity is

closer to 1, the infrared polarization degree of the coating reduces.

Conclusions The geometric attenuation model established in this study can effectively eliminate the sharp inflection point of the blind model and ensure that the model does not exhibit larger amplitudes at large incident angles, improving the accuracy of the model. Considering the geometric attenuation and diffuse reflection effects, the calculation results of the linear polarization degree is consistent with the experimental data. The greater the surface roughness of the coating, the lower the infrared polarization degree; the more significant the geometric attenuation effect, the lower the infrared polarization degree of the coating. The diffuse reflection effect is negatively correlated with the infrared polarization degree of the coating, and the contributions of geometric attenuation effect and diffuse reflection effect are elucidated. Different linear polarization degrees are obtained with the change in the incident zenith angle, and the peaks of the linear polarization degrees of the camouflaged coatings appear between 70° and 80° . When the ratio of the ambient radiation of the coating is closer to 1, the degree of linear polarization is lower. The conclusions above provide theoretical support for camouflaged coatings in infrared polarization stealth and anti-stealth coatings. Because of the limitations of theory and space, many areas in this study still require further improvement. For example, the effects of volume/surface scattering on the surface-polarized radiation characteristics of infrared coatings are ignored in this study. Further research should be conducted, considering volume/surface composite radiation modeling.

Key words laser optics; infrared polarization; geometric attenuation effects; diffuse reflection effect; polarized bidirectional reflectance distribution function; camouflage coating