

文章编号: 1672-8785(2025)08-0022-08

基于柯西分布的红外偏振 辐射优化模型

王文轩 李 瑶* 王利国

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 为了更好地表征物体表面辐射偏振特性, 以 P-G 模型为基础, 针对物体表面微面元分布情况, 建立了一种基于柯西分布的二分量偏振双向反射分布函数 (Polarization Bidirectional Reflection Distribution Function, PBRDF) 模型。基于红外偏振辐射传输特性, 采用黑体辐射定律推导出红外辐射线偏振度模型, 并通过设计红外偏振成像实验对该模型进行检验。将实测数据与数值计算结果进行对比, 分析引入柯西分布后的红外线偏振度模型相较于高斯分布对精度的影响。结果表明, 采用柯西分布表征的微面元模型在描述物体表面的红外线偏振度时具有更好的适用性。研究结果为双向反射分布函数 (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF) 模型精度的进一步优化提供了理论支撑与技术支持。

关键词: 红外偏振; 柯西分布; 偏振双向反射分布函数; 线偏振度

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.08.004

Infrared Polarization Radiation Optimization Model Based on the Cauchy Distribution

WANG Wen-xuan, LI Yao*, WANG LI-guo

(School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To better characterize the radiation polarization characteristics of the object surface, a two-component polarization bidirectional reflectance distribution function (PBRDF) model based on the Cauchy distribution is established based on the P-G model and the distribution of microfacets on the surface. Based on the transmission characteristics of infrared polarization radiation, a linear polarization model for infrared radiation is derived using the blackbody radiation law. This model is then tested through a designed infrared polarization imaging experiment. Measured data are compared with numerical calculation results to analyze the impact of the Cauchy distribution on the accuracy of the infrared polarization model compared to the Gaussian distribution. The results show that the micro-facet model characterized by the Cauchy distribution is more suitable for describing the infrared polarization degree of an object surface. These findings provide theoretical and technical support for further optimizing the accuracy of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model.

Key words: infrared polarization; Cauchy distribution; polarization bidirectional reflection distribution function; linear polarization

收稿日期: 2024-12-30

作者简介: 王文轩(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外偏振特性建模方面的研究。

*通讯作者: E-mail: 750518078@qq.com

0 引言

随着红外探测技术的不断发展, 利用红外偏振探测方法获取目标偏振维度的信息, 可以有效地抑制背景因素对成像的影响, 提高目标与背景的对比度, 在军事领域中的目标识别、穿云透雾等方面贡献了独特的力量^[1]。

偏振特性建模是研究目标表面红外偏振特性的一个重要切入点。通常采用 PBRDF 建模来研究目标表面的偏振特性。谢东辉等^[2]通过研究叶片表面的偏振特性, 将 Cook_Torrance 模型转换成 PBRDF 模型, 并利用实验数据对模型进行了参数反演, 建立了叶片偏振与生态特性之间的对应关系。冯巍巍等^[3]建立了一种适用于涂层材料的 PBRDF 模型, 并利用实验数据验证了该模型的准确性。Wan K 等^[4]通过分析金属材质表面反射分量的组成成分, 提出了一种包含理想、定向漫反射和镜面反射的 PBRDF 模型, 提高了模型精度。但该模型的理想漫反射分量没有考虑入射角与出射角的影响。刘宏等^[5]考虑了不同相邻微面元的倾斜角度对几何衰减效应的影响, 提出了一种基于积分型遮蔽函数的 BRDF 模型。但该模型并未推导至偏振化形式。汪方斌等^[6]针对 Blinn 遮蔽效应, 基于三分量假设反推出新的 PBRDF 穆勒矩阵。朱达荣等^[7]建立了一种改进的六参量 PBRDF 模型, 分析了不同粗糙度下的偏振度分布。结果表明, 通过增加漫反射部分的建模, 可提高模型的准确性。杨博文等^[8]利用自行研制的 BRDF 测量装置测量了紫铜表面(可见光波段)的面内光谱 BRDF。结果表明, 在远离镜面反射的方向上, Gauss 分布的拟合效果与测量值的吻合度较差。

以上研究采用高斯分布对 BRDF 微面元分布进行表述, 将表面近似为一个理想朗伯体。在非镜面宽角度反射时, 与实际光线的分布情形不符, 因此需要针对更贴合实际的微面元分布情况展开研究。

本文基于 P-G 模型, 采用柯西分布描述微面元分布情况, 替换经验模型中常用的高斯分

布; 基于镜面反射与二分量假设以及改进的几何衰减模型, 提出基于柯西分布的二分量 PBRDF 模型; 采用 Stokes 矢量法并考虑大气辐射, 推导红外线偏振度模型, 然后结合相关实验对理论模型进行验证, 并分析偏振度模型的影响因素。

1 理论基础

1.1 Priest-Gerber 模型

为了表征物体表面光散射的空间分布, Nicodemus F E 于 20 世纪 70 年代提出了 BRDF 模型, 通过建立目标表面的 BRDF 表达式来描述物体表面的反射特性。Torrance K E 和 Sparrow E M 基于微面元理论提出了 T-S 模型。该模型采用高斯分布拟合相邻微面元之间的概率分布情况, 其函数表达式为

$$\begin{cases} f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{P(\alpha)}{4\cos\alpha\cos\theta_i\cos\theta_r} \\ P(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\cos^3\alpha} \cdot \exp(-\tan^2\alpha/2\sigma^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, α 表示微面元法线与目标表面法线的夹角; θ_i 和 θ_r 分别表示入射方向、反射方向与目标表面法线的夹角; φ_i 和 φ_r 分别表示入射方位角和观测方位角; $P(\alpha)$ 表示以高斯函数表征的微面元分布; σ 表示表面粗糙度。

图 1 为微面元模型示意图。其中, Z 轴为目标表面的法线, β 表示入射方向与目标表面

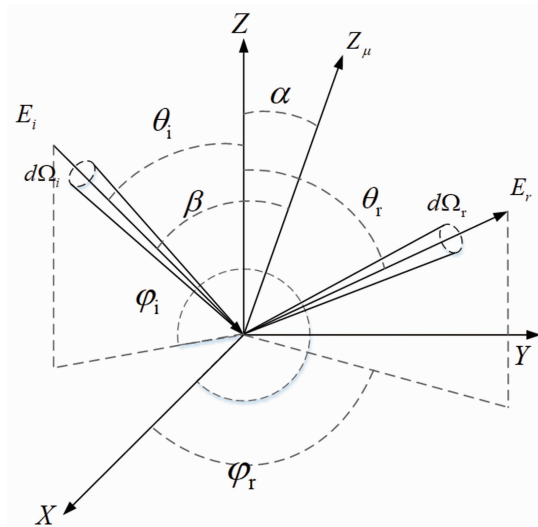


图 1 微面元模型示意图

法线的夹角。图 1 中各角度之间满足一定的等量关系：

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

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

Priest R G 和 Germer T A 在 2000 年提出的 P-G 模型是一种考虑物体表面偏振特性的反射辐射模型。它是在 T-S 模型的基础上进行改进的偏振化 BRDF 模型。结合电磁场理论，在引入坐标旋转角后，可以将 Jones 矩阵转换为包含偏振信息的 Muller 矩阵，再将 Muller 矩阵与 T-S 模型进行有机结合，得到能够凸显物体偏振特性的 P-G 模型。

Jones 矩阵偏振化的表达式如下：

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

式中， η_i 和 η_r 为坐标旋转角，与微面元中的 θ_i 、 θ_r 、 β 之间满足以下关系：

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

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

通过对应关系可以得到 16 个 Muller 矩阵元素。将其与 T-S BRDF 模型作用，得到全偏振的 PBRDF 模型。即 P-G 模型的表达式为

$$f_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{\exp[-\tan^2\alpha/2\sigma^2]}{8\pi\sigma^2 \cos^4\alpha \cos\theta_i \cos\theta_r} M_{j,l}^s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (7)$$

P-G 模型是目前研究物体表面偏振特性的常用半经验模型，但仍有一定的局限性：没有考虑相邻微面元之间对光束的遮挡和阴影效应，且对镜面反射与漫反射的考虑较为片面，忽略了漫反射中也存在偏振效应这一重要因素^[8]。

此外，受物体表面粗糙度的影响，基于高斯分布的微面元分布表征精度会随入射天顶角的增大而出现一定的误差。因此，需要

结合偏振特性的影响因素对模型进行改进。

1.2 基于柯西分布的二分量 PBRDF 模型

1.2.1 柯西概率分布函数

研究表明，观测面在镜面反射角附近时，采用柯西函数和高斯函数描述反射面倾角分布对 BRDF 模型有相近的拟合效果；但观测角度远离镜面反射角时，BRDF 模型利用柯西概率分布函数表征反射面倾角分布的拟合效果更好^[9]。考虑到实际物体表面的微细加工结构高度起伏不定，本文采用马帅等人^[10]提出的柯西函数表征微面元倾角分布：

$$P(\sigma, q) = \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{\pi \cos^3\alpha (\tan^2\alpha + 2\sigma^2)^q} \quad (8)$$

式中， q 表征与材质特性有关的常量，它的引入增强了微面元模型的灵活性； σ 为表面粗糙度。模型考虑了目标自身辐射强度的方向依赖性，并在合理范围内进行简化与修正，使之适用于仿真研究。

1.2.2 几何衰减模型

由于任何表面都具有一定的粗糙度，目标表面越粗糙，遮蔽效应的产生概率就会增大，从而对目标表面的散射特性产生影响。因此，建立目标表面的 PBRDF 模型时，需要考虑遮蔽效应的影响^[8]。

考虑遮蔽与阴影效应时，将两个相邻微面元全部简单地看作等腰 V 型结构并对其进行研究，是目前最常用的 Blinn 模型所采用的分析方法。但是，微面元的实际分布情况必然与理想状态下的结构不符，因此该模型存在一定的优化空间。基于此，对该模型进行了改进，得到遮蔽函数和阴影函数模型（即几何衰减因子函数模型）^[11]。

几何衰减效应包括遮蔽效应和阴影效应。当入射角过大时，由于入射光被遮挡而产生阴影，反射光能量衰减，形成阴影效应。当反射角过大时，反射光受到遮蔽，导致其能量衰减，形成遮蔽效应。

由于改进的几何衰减效应模型是将微面元分布近似为高斯分布展开的，因此在引入柯西

分布后, 模型是否依然具有适用性有待进一步仿真验证。

按照入射光反射的比例可以将阴影模型分为三种情况: 完全通过、完全阴影、半通过半阴影模型。阴影函数对应的三种模型如图 2 所示。

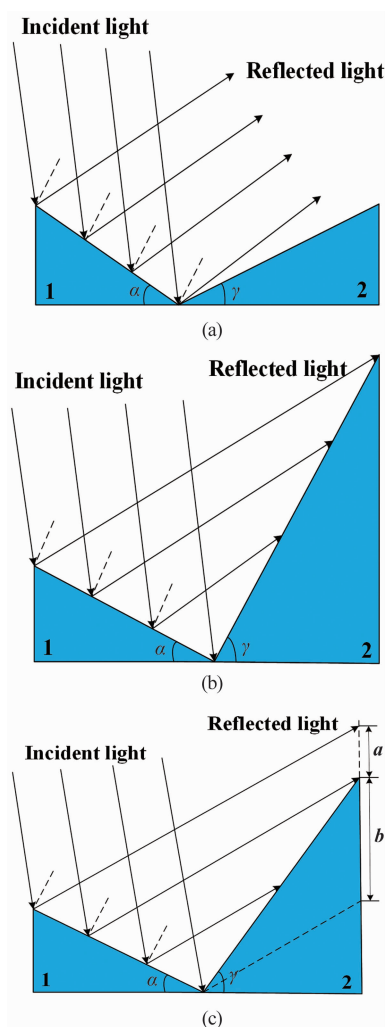


图 2 (a)完全通过模型; (b)完全阴影模型; (c)半通过半阴影模型

图 2 中, 角度 γ 满足柯西概率分布。根据三角函数几何关系及概率分布函数, 可知阴影函数的三种模型反射角通过的概率表达式分别为 G_{s1} 、 G_{s2} 、 G_{s3} , 则阴影函数模型可表示为 $G_s = G_{s1} + G_{s2} + G_{s3}$ 。其中

$$G_{s1}(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \int_{-\pi/2}^0 1 \cdot p(\gamma) d\gamma + \int_0^{\pi/2 - \theta_i} 1 \cdot p(\gamma) d\gamma \\ = \int_{-\pi/2}^{\pi/2 - \theta_i} p(\gamma) d\gamma \quad (9)$$

$$G_{s2}(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \int_{\pi - 2\theta_i + \alpha}^{\pi/2} 0 \cdot p(\gamma) d\gamma = 0 \quad (10)$$

$$G_{s3}(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \int_{\pi/2 - \theta_i}^{\pi - 2\theta_i + \alpha} p(\gamma) \\ \times \frac{\cos \alpha \cot \theta_i + \cos \gamma \cot \theta_i + \sin \alpha - \sin \gamma}{\cos \alpha \cot \theta_i + \sin \alpha} d\gamma \quad (11)$$

$$G_s(\theta_i, \theta_r, \sigma) = G_{s1} + G_{s2} + G_{s3} \quad (12)$$

与阴影函数模型的三种情况相似, 遮蔽函数也可分为三种模型: 完全通过、完全遮蔽、半通过半遮蔽模型。其推导过程可采用与阴影函数模型同样的计算方法。

图 3 中, 与阴影函数模型的三种情况相似, 遮蔽函数的三种模型可以表示为 G_{m1} 、 G_{m2} 和 G_{m3} , 且遮蔽函数的表达式为 $G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{m3}$ 。其推导过程可采用与阴影函数模型同样的计算方法。

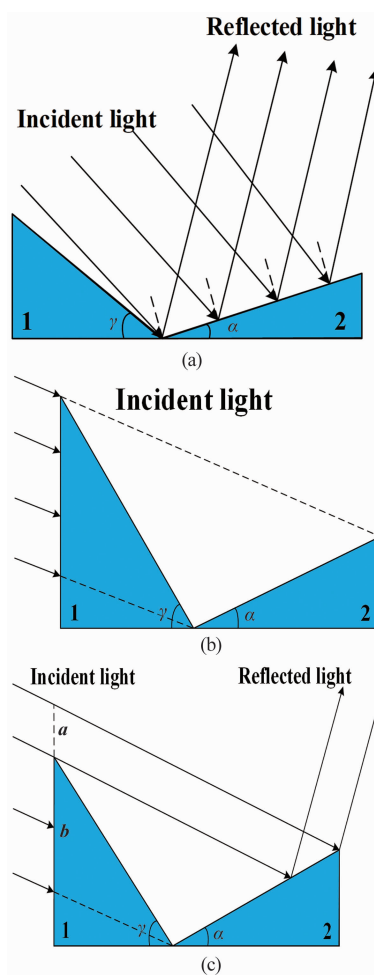


图 3 (a)完全通过模型; (b)完全遮蔽模型; (c)半通过半遮蔽模型

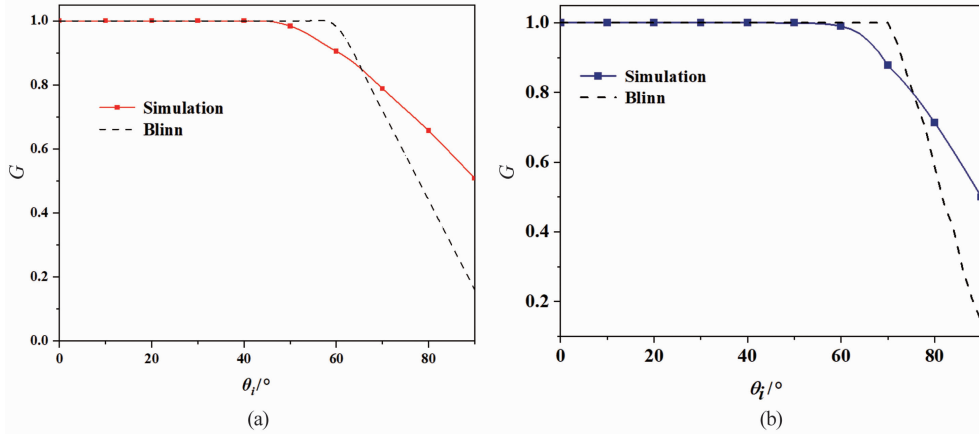


图 4 (a)基于柯西分布的几何衰减模型模拟图；(b)文献[5]中的几何衰减模型模拟图

阴影效应和遮蔽效应均会对反射光产生衰减，因此几何衰减效应的表达式为二者取最小值^[8]，即

$$G(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \min(G_s, G_m) \quad (13)$$

根据上述理论分析，以入射角 $\theta_i = 30^\circ$ 、表面粗糙度 $\sigma = 0.3$ 为初始条件进行模拟比较，可得到不同入射角下的几何衰减效应的仿真模型，如图 4 所示。可以看出，该模型能够有效消除 Blinn 模型所存在的尖锐拐点，使得曲线相对平滑；同时考虑了表面粗糙度对模型的影响，使其更加符合实际。

将图 4 中的仿真结果与文献[5]中基于高斯分布的几何衰减因子修正模型进行对比后可以看出，采用柯西分布的微面元表征对几何衰减模型依然适用。

1.2.3 漫反射模型

杨志勇等^[12]通过红外偏振成像实验发现，由于没有考虑漫反射的影响，实验和仿真结果并不吻合。因此分析目标偏振特性的影响因素时，需要考虑漫反射作用。

基于杨玉峰等^[13]提出的六参数模型中对 Minnaert 模型的改进，可以更好地描述目标材料的漫反射特性。漫反射偏振模型如下：

$$f_d = \frac{k_d}{\pi} (\cos\theta_i \cos\theta_r)^c M_{j,l}^d \quad (14)$$

式中， k_d 为漫反射系数；待定系数 C 的取值范围是 $(-1, 0)$ 。漫反射虽为非偏振，但对反射辐射有一定程度的影响，因此相应 Muller

矩阵中 $M_{60}^d = 1$ ，其余元素为 0。

基于几何衰减因子和漫反射效应对目标偏振特性的影响，建立基于几何衰减因子的二分量 PBRDF 模型。该模型能提高目标红外偏振特性建模的精度，其表达式为

$$\begin{aligned} & F(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \sigma) \\ &= \frac{k_s(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}G(\theta_i, \theta_r, \sigma)}{4\pi\cos\theta_i\cos\theta_r(\cos\alpha)^4[(\tan\alpha)^2 + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \\ & \quad \times M_{j,l}^s + \frac{k_d}{\pi} (\cos\theta_i \cos\theta_r)^c \cdot M_{j,l}^d \end{aligned} \quad (15)$$

式中， k_s 为镜面反射系数。

1.3 目标红外辐射偏振特性建模

红外辐射偏振特性包括自发辐射和反射辐射。由于实验环境下的目标距离探测器较近，忽略传输过程中的大气辐射，故目标周围的环境辐射是红外辐射偏振特性的重要影响因素。

根据红外偏振成像原理可知，入射到红外偏振片前的 Stokes 矢量为反射辐射偏振矢量 S^r 与自发辐射矢量 S^e 之和。

反射辐射 S^r 的具体求解流程如下：在默认探测环境为自然环境的前提下，采用 MODTRAN 软件计算自然光在长波红外波段（本文采用 $10.6 \mu\text{m}$ ）的直射照度；将其乘以入射角，得到入射表面的太阳光斜射照度 E_0 ；随后乘以自然光的 Stokes 矢量，得到目标表面以光照度表示的反射光 Stokes 矢量；最后基于 pBRDF 的定义式，将以照度表示的反射光 Stokes 矢量与 BRDF 函数相乘，可得到以光亮

度表示的 Stokes 矢量。

$$S^r = E_0 \cdot \cos \theta_i \cdot I_i \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \sigma) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (16)$$

式中, I_i 为自然光的 Stokes 矢量, $I_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

目标的自发辐射通过黑体辐射定律求解。依据 Stokes 原理, 自发辐射的 Stokes 矢量为

$$\begin{cases} I_e = I(0^\circ) + I(90^\circ) \\ Q_e = I(0^\circ) - I(90^\circ) \\ U_e = I(45^\circ) - I(135^\circ) \end{cases} \quad (17)$$

式中, 圆偏振分量很小, 近似为 0。 $I(0^\circ)$ 、 $I(45^\circ)$ 、 $I(90^\circ)$ 和 $I(135^\circ)$ 分别表示四个不同偏

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{1}{E_0 \cdot \cos \theta_i \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left(\frac{k_s(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2} G(\theta_i, \theta_r, \sigma)(R_s + R_p)}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r (\cos \alpha)^4 [(\tan \alpha)^2 + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} + \frac{k_d(\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \cdot M_{j,l}^d}{\pi} \right) \sin \theta_r d\theta_r d\Omega_r + \frac{2 \cdot (\rho_p + \rho_s)}{2}}{\left(E_0 \cdot \cos \theta_i \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{k_s(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2} G(\theta_i, \theta_r, \sigma) \cos 2\eta_i (R_s - R_p)}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r (\cos \alpha)^4 [(\tan \alpha)^2 + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \sin \theta_r d\theta_r d\Omega_r + \frac{\rho_p - \rho_s}{2} \right)^2 + \left(E_0 \cdot \cos \theta_i \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{k_s(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2} G(\theta_i, \theta_r, \sigma) \sin 2\eta_i (R_s - R_p)}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r (\cos \alpha)^4 [(\tan \alpha)^2 + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \sin \theta_r d\theta_r d\Omega_r \right)^2} \quad (18)$$

2 实验分析

2.1 实验设计及流程

为验证模型优化是否有效, 搭建光路, 开展红外偏振成像实验, 然后采集实验数据并将其与理论模型的数值计算结果进行对比分析。

实验原理如下: 通过偏振调制将目标景物发出的光调制为不同方向的偏振光, 然后利用成像透镜将偏振光成像在探测器上, 获取对应的偏振方向图像。通过四次旋转偏振片, 获得目标的完整偏振信息; 然后对其进行解调处理, 得到目标的偏振度、偏振角等信息。

具体实验过程如下: 选择合适的材料, 利用白光干涉仪对样片的粗糙度均值进行测量; 随后搭建光路, 将样片置于旋转台的中心位置; 通过旋转转台 ($0 \sim 90^\circ$, 间隔 6°) 并旋转偏振片的角度 (间隔 45°), 采集不同入射角度、不同偏振方向的红外强度图像。

得到红外图像后, 编写 Matlab 代码, 对图像的灰度信息进行处理, 得到数字值; 接着

振方位角下的光照强度。依据水平自然光与垂直自然光的 Stokes 矢量可得 $U_e = 0$ 。由黑体辐射定律可知, 在恒温条件下物体表面的发射率、透射率与吸收率之和为 1。

根据基尔霍夫定律, 物体在同一温度下光谱的发射率等于吸收率, 因此在忽略透射的前提下, 可以得到推广至偏振领域的发射率表达式。

基于上述推导, 最终求得目标自发辐射的 Stokes 矢量。将其与反射辐射的 Stokes 矢量相加, 得到基于柯西分布的二分量 PBRDF 模型的总 Stokes 矢量。依据偏振度定义可得到线偏振度模型, 如式(18)所示。

将数字值标定为红外辐射强度值, 最终得到在该入射角下测量的红外偏振度。

2.2 实验过程

本文对航空铝、不锈钢等材料进行了偏振成像实验。其中, 红外偏振片的工作波长为 $10.6 \mu\text{m}$, 消光比为 100:1; 选用中长波段的硅材料为基底材料, 它具有良好的透过率。长波红外成像系统的工作波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, 分辨率为 1280×1024 , 像元尺寸为 $12 \mu\text{m}$, 探测系统的探测距离为 $2 \sim 500 \text{ m}$ 。经测量, 最终得到数值仿真中所设定的相关参数 (见表 1 和表 2)。

表 1 不锈钢红外偏振成像实验的相关参数

参数	内容
材料	不锈钢
表面粗糙度	$0.445 \mu\text{m}$
探测波长	$10.6 \mu\text{m}$
环境温度	25°C
折射率	1.508

表 2 航空铝红外偏振成像实验的相关参数

参数	内容
材料	航空铝
表面粗糙度	$0.905\ \mu\text{m}$
探测波长	$10.6\ \mu\text{m}$
环境温度	$26\ ^\circ\text{C}$
折射率	1.373

为获得更好的实验效果并减小误差,实验过程中主要采取以下三项措施:

(1)测量样片表面粗糙度时,同时采集样片同一平面上的四个点位,并在每个点位放大后的显微结构中同时截取两条对角线;将所有横截面截取得到的粗糙面起伏纵坐标的绝对值取平均值,得到样片的平均粗糙度。

(2)在理论偏振度变化较大的角度范围内($60^\circ\sim 90^\circ$),改为每间隔 3° 采集一组红外图像。

(3)计算最终偏振度时,在偏振度图像中的相同位置上截取相同容量大小的数据,将数字值标定为偏振强度值,然后计算红外偏振度。

2.3 结果分析

在处理实验数据、得到偏振度结果的同时,编写程序,对相同参数设置下的理论模型进行数值仿真(观测天顶角为 60°)。最终得到图 5~图 7 所示的实验及仿真结果图。

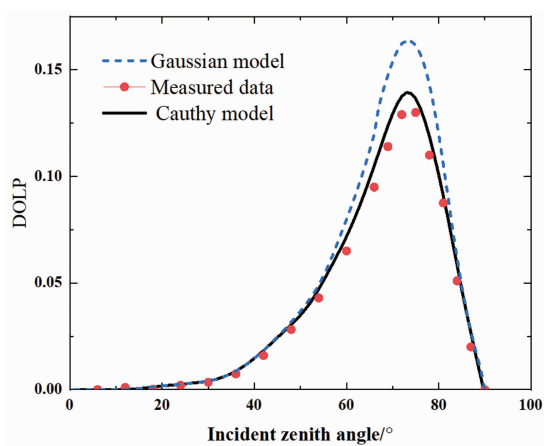


图 5 不锈钢偏振成像实验结果

将实测数据与基于高斯分布表征的线偏振度理论模型、基于柯西分布的线偏振度优化模型的仿真结果进行了对比。从图 5 和图 6 中可

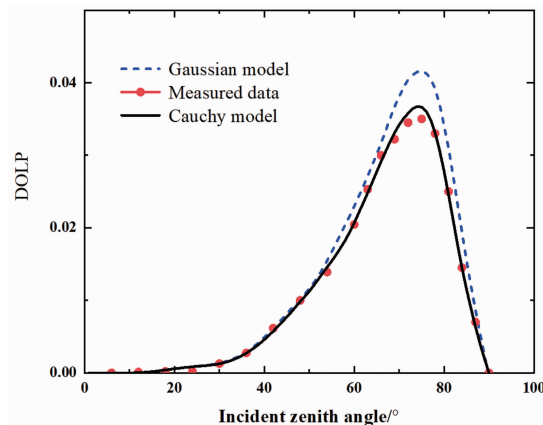


图 6 航空铝偏振成像实验结果

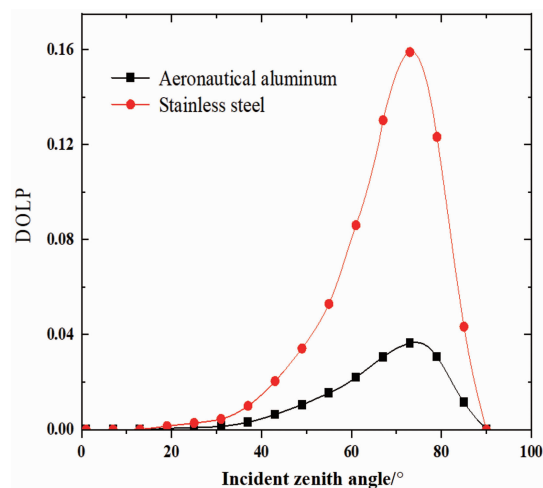


图 7 不锈钢、航空铝红外偏振度理论模型仿真结果以看出,在入射表面靠近镜面反射方向时,采用高斯分布或柯西分布对目标的红外线偏振度都有比较准确的描述(即入射天顶角 $\theta_i < 60^\circ$ 时);随着入射角增大,即观测方向逐渐远离镜面反射角时,采用柯西分布对线偏振度拥有比高斯分布更好的拟合效果,特别是在线偏振度峰值区域附近($70^\circ < \theta_i < 80^\circ$)时,对于微面元分布采用柯西分布的表述方法能够有效提升线偏振度模型的有效性,使模型更符合实际。

采用不同理论模型对样板进行偏振度模拟的同时,本文也对两种样板在相同条件下的偏振度理论仿真结果进行了对比,进而定性分析影响其红外线偏振度的其他因素。

从图 7 中可以看出,对于不同粗糙度的物体,其红外线偏振度也有区别。随着目标表面粗糙度的增大,红外线偏振度呈下降趋势,对

偏振度峰值的影响尤为明显,其原因在于几何衰减效应、漫反射效应对偏振信息的获取产生了更多的影响。

3 结束语

本文依据微面元理论、改进的几何衰减因子模型以及漫反射效应,提出了一种基于柯西微面元分布的二分量 PBRDF 模型。基于 Stokes 矢量法并结合红外偏振辐射特性,推导出目标表面的红外辐射线偏振度计算模型,并通过设计实验对模型优化结果的可行性进行了验证分析。结果表明,采用柯西分布的微面元表征对几何衰减模型依然具有适用性,能够有效消除 Blinn 模型存在的尖锐拐点,使仿真曲线更加平滑,同时在大入射角/大反射角情况下,目标的偏振度会降低;通过将实测数据与两种模型的数值计算结果进行对比分析,可以看出基于柯西分布的微面元表征相较于高斯分布在观测方向远离镜面反射角时更加贴合实际。本文的研究成果可为 P-G BRDF 半经验模型的进一步优化提供理论支撑。

鉴于篇幅与理论的局限性,本文未考虑对距离较远的物体进行建模时大气辐射对探测器接收到的偏振信息产生的影响,后续将基于 MODTRAN 对大气辐射特性进行深入研究。

参考文献

- [1] 周强国,黄志明,周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用 [J]. 红外技术, 2021, 43(9): 817–828.
- [2] 谢东辉,王培娟,朱启疆,等. 单叶片偏振 BRDF 建模及参数反演 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3324–2238.
- [3] 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.
- [4] Wang K, Zhu J P, Liu H. Degree of polarization based on the three-component pBRDF model for metallic materials [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(2): 024210.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 朱达荣,胡子粮,汪方斌,等. 基于遮蔽函数修正的金属表面自发辐射偏振模型 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 382–387.
- [8] 于洁,巩蕾,王海斌,等. 伪装涂层红外偏振模型优化及辐射特性研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(13): 111–118.
- [9] 杨博文,马王杰慧,刘彦磊,等. 紫铜粗糙表面的光谱双向反射分布函数测量研究 [J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1385–1394.
- [10] 马帅,白廷柱,曹峰梅,等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3357–3361.
- [11] 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.
- [12] 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, 2021, 42(2): 0220001.
- [13] 杨玉峰,吴振森,曹运华,等. 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): 229.