

# 基于双向分布反射函数的红外偏振特性分析

陈伟力 金伟其 王霞\*

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 红外偏振成像技术是一种新的探测技术,其主要利用目标的红外偏振特性背景与目标区分开来。目前,主要是通过实验获取目标场景的偏振信息图像(偏振度、偏振角图像),进而研究分析目标的红外偏振特性。但红外偏振信息与多种因素相关,仅通过常用的偏振信息图像无法获取需要的数据。为了更深入地研究红外偏振成像理论和目标的红外偏振特性,通过偏振双向反射分布函数模型推导了红外发射率模型和红外热偏振成像辐射控制方程,得出了偏振信息数学表达式,并在理论上分析了材料粗糙度及折射率对偏振信息的影响,这将为实现基于红外热偏振成像的目标探测提供理论指导。

**关键词** 物理光学;红外;偏振成像控制方程;偏振双向分布反射函数;红外偏振发射模型

**中图分类号** TN219; O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100503

## Infrared Polarization Characteristic Study Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function

Chen Weili Jin Weiqi Wang Xia

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Infrared polarization imaging technology is a new detection technique, and it can distinguish background and target through the infrared polarization characteristics of target. At the present time, infrared polarization characteristics of targets are always studied by experiments that acquire images including degree and angle of linear polarization. It is known that the infrared polarization information is closely related with many factors, therefore it can be not acquired required data only through polarization image. In order to study infrared polarization imaging theory and infrared polarization characteristics of object closely, infrared polarized emissivity model and control equation for infrared polarized imaging through polarized bidirectional reflectance distribution function are derived, and mathematical expression for polarization information is given, and it is analyzed in theory by considering the influence of effect refractive index and roughness of target surface. This work will provide theory guidance for target detection based on infrared polarization imaging.

**Key words** physical optics; infrared; control equation of polarized imaging; polarized bidirectional reflectance distribution function; infrared polarized emissive model

**OCIS codes** 260.3060; 260.5430

## 1 引 言

红外偏振成像技术是近年来国际上发展起来的一种新的红外探测技术,其主要利用目标的红外偏振特性将本来难以识别的杂乱背景和目标区分开来<sup>[1~4]</sup>。目前,国内外获取目标红外偏振特性的主要手段是通过红外偏振成像系统采集不同偏振方向

的热辐射图来计算目标的偏振信息图像,但目标红外热偏振信息与物体表面粗糙度、折射率、反射及自身辐射的空间分布、观测方位、传输介质和波长等多种因素相关<sup>[5~6]</sup>,如果仅通过常用的偏振信息图像是无法获取准确数据的。为了有效地确定目标的方位、选择最佳观察方位、消除各种因素对目标偏振信

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61077077)资助课题。

作者简介: 陈伟力(1979—),女,博士研究生,主要从事热成像及其图像处理等方面的研究。E-mail: weili1002@bit.edu.cn

导师简介: 金伟其(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: angelniuniu@bit.edu.cn

息的影响、对多种偏振信息进行有效再现等问题,还需要对红外偏振成像进行更深入的理论分析和更细致的理论研究。

将通过偏振双向分布反射函数(PBRDF)推导目标的红外辐射率模型和红外热偏振成像辐射控制方程,研究偏振特征信息相对于材料粗糙度及反射率的关系,为红外热偏振成像的目标探测与识别技术研究提供理论基础。

## 2 红外偏振辐射控制方程

红外偏振成像不仅利用目标与景物的红外辐射特性差异,而且利用其间偏振特性差异进行目标探测与识别。红外偏振成像过程与传统的红外成像(光强成像)过程类似,只需在景物辐射的成像光路中加入线栅偏振器作为检偏器,通过偏振器件对目标场景的反射或自身辐射进行偏振滤波。

### 2.1 红外偏振成像的斯托克斯(Stokes)表示方法

通常描述光波偏振态的方法有琼斯矢量法和斯托克斯(Stokes)矢量法<sup>[7]</sup>,Stokes 矢量与光强成正比,利用 4 个 Stokes 参量来描述光波的偏振态和强度,具有强度量纲,可以直接被探测器探测。Stokes 矢量表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 + g_{90} \\ g_0 - g_{90} \\ g_{45} - g_{135} \\ g_{\text{RCP}} - g_{\text{LCP}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $g_\theta$  ( $\theta=0, 45, 90, 135$ ) 表示偏振片旋转  $\theta$  角度时的偏振态图像,下标 RCP 和 LCP 分别表示右旋和左旋圆偏振, $I$  与入射光强有关, $Q$  与  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向的线偏振信息有关, $U$  与  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向的线偏振信息有关, $V$  与左/右旋的圆偏振信息有关,由于自然目标的圆偏振分量很小<sup>[4]</sup>,通常假定  $V=g_0 + g_{90} - 2g_{45} = 0$ 。

表征偏振态可用偏振度  $p$  (DOLP) 和偏振角  $\alpha$  (AOLP),

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad \alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{U}{Q} \right], \quad (2)$$

式中  $p$  是  $0 \sim 1$  的无量纲数, $p=0$  表示非偏振光, $p=1$  表示全偏振光,其它位为部分偏振光;偏振角  $\alpha$  表示入射光的偏振方向相对于  $x$  轴的夹角,对于部分偏振光则是能量最大的偏振方向与  $x$  轴的夹角。

### 2.2 基于偏振双向分布反射函数的数学模型

目标场景的红外热偏振信息与物体表面粗糙度、折射率、反射和自身辐射的空间分布、观测方位、传输介质和波长等多种因素相关,包含物体自身的

辐射和对环境辐射的反射,需要采用 PBRDF 进行描述。近年来 PBRDF 已成功应用到偏振成像探测领域,美国罗切斯特技术学院 Michael G. Gartley 等<sup>[8]</sup>将 PBRDF 用于红外(长波)偏振仿真研究,取得了很好的仿真效果。国内近年来虽然已有偏振热成像技术研究和应用实验分析<sup>[9~12]</sup>,但在目标特性方面主要还是依据传统模型,只有少数涉及双向分布反射函数理论和器件红外偏振特性,冯巍巍等<sup>[5,6]</sup>通过 PBRDF 建立伪装涂层模型,将 PBRDF 应用到目标的隐身及伪装探测,取得了初步的效果。

#### 2.2.1 偏振双向分布反射函数

双向分布反射函数(BRDF)表示不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反射特性,可全面反映各种因素对反射辐射的影响。BRDF 的研究一般应用 T-S(Torrance-Sparrow) BRDF<sup>[12]</sup> 模型,该模型使用高斯分布作为微面元的概率分布函数(基于微面元的理论),描述反射的微面元理论<sup>[13]</sup>可简述为:如果样品表面粗糙度大于或等于入射辐射波长,则其可被看作是由一组微面元组成;微面元的法线分布满足某种概率分布,每个微面元的反射特性可近似看作是镜面反射。图 1 给出微面元模型的角度关系, $z_\mu$  为微面元的法线方向, $\theta$  为  $z_\mu$  与样品表面法线  $z$  的夹角, $\phi$  为入射、反射光线投影到由  $x, y$  确定的平面上与  $x$  轴间的夹角(即方位角), $\beta$  为入射方向与微面元法线间的夹角。 $\theta, \theta_i, \theta_r, \phi, \phi_i, \phi_r, \beta$  (下标  $i, r$  分别表示入射和反射)之间满足<sup>[8]</sup>

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta}, \quad (3)$$

$$\cos(2\beta) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_r - \phi_i), \quad (4)$$

表征微面元法线分布的 BRDF 表达式为<sup>[13]</sup>

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp[-\tan^2 \theta / 2\sigma^2]}{\cos \theta_i \cos \theta_r}, \quad (5)$$

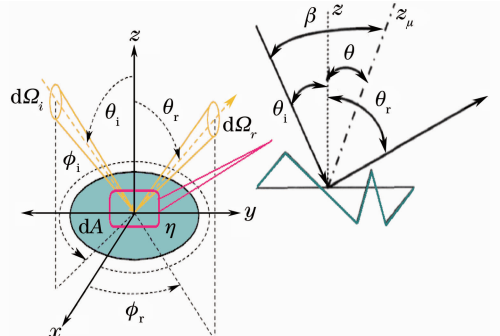


图 1 微面元模型角度关系

Fig. 1 Angle relationship of micro-surface model

式中  $\sigma$  表示被测目标微粗糙度。T-S BRDF(5)式的物理意义为：给定方向入射到样品表面上的辐照度经样品表面反射在某一方向产生的幅亮度，而对应的 PBRDF 的表达式需要通过电磁场理论推出<sup>[13]</sup>，主要通过将标量 BRDF 函数与  $4 \times 4$  的 Muller 矩阵  $\mathbf{M}$  作用得到偏振化 BRDF 模型，且  $\mathbf{M}$  中各分量  $M_{ij}$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ ) 由琼斯矩阵分量推出<sup>[13]</sup>，PBRDF 常表示为

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-\tan^2 \theta / 2\sigma^2)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot \mathbf{M}(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r). \quad (6)$$

### 2.2.2 红外偏振成像辐射控制方程

对于非偏振入射，根据 BRDF 的物理意义<sup>[5,6]</sup>可知，BRDF 是来自方向地表辐射度的微增量与其所引起的方向上反射辐射亮度增量之间的比值，那么物体表面反射辐射亮度增量可表示为

$$dL(\theta_r, \phi_r, \lambda) = dE(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cdot \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda), \quad (7)$$

(7)式表示：设波长为  $\lambda$ ，从  $(\theta_i, \phi_i)$  方向，以辐射亮度  $L(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  投射到点目标，造成该点目标的辐照度增量为  $dE(\theta_i, \phi_i, \lambda) = L(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i$ ，而探测器从方向  $(\theta_r, \phi_r)$  观察目标，接收到来自目标对外来辐射  $dE$  的反射辐射，其亮度值为  $dL(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ 。

当辐射亮度和辐射照度变为类似于 Stokes 矢量形式时，则偏振双向反射分布函数变为类似 Muller 矩阵的矩阵，可表示为

$$d\mathbf{L}(\theta_r, \phi_r, \lambda) = \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cdot d\mathbf{E}(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cdot \cos \theta_i \mathbf{L}(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_i. \quad (8)$$

物体的光谱比辐射率定义  $\epsilon(\lambda, T)$  为在相同温度  $T$  下，目标的光谱辐射亮度  $L_{\text{obj}}(\lambda, T)$  与目标的光谱辐射亮度对应的黑体辐射亮度  $L_{\text{B}}(\lambda, T)$  之比，即

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L_{\text{obj}}(\lambda, T)}{L_{\text{B}}(\lambda, T)}, \quad (9)$$

式中  $\lambda$  为辐射波长，对于一般物体，温度变化范围不大时， $T$  对于  $\epsilon(\lambda, T)$  影响较小，常可忽略，因此下面的讨论中  $\epsilon(\lambda, T)$  不再表示为  $T$  的函数。将其延伸到红外偏振来分析，则辐射率的简单通式转换为类似于 Stokes 矩阵的矢量，偏振光谱比辐射率的矢量  $\boldsymbol{\epsilon}(\lambda)$  可表为

$$\boldsymbol{\epsilon}(\lambda) = \frac{\mathbf{L}_{\text{obj}}(\lambda, T)}{L_{\text{B}}(\lambda, T)}, \quad (10)$$

由于黑体辐射的非偏性，黑体辐射率矢量表示为  $\boldsymbol{\epsilon}_0 = (1, 0, 0, 0)^T$ 。

通常，红外偏振成像接收的辐射包括场景的辐射和对其它辐射源的反射，因为一般辐射物体都是不透明的，所以对于一般物体的热辐射有

$$\rho(\lambda) + \epsilon(\lambda) = 1. \quad (11)$$

那么对于不透明的辐射物体，其目标表面总的辐射亮度可以表示为

$$\mathbf{L}_{\text{tot}} = \mathbf{L}_e + \mathbf{L}_r = L_{\text{B}} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_{\text{surf}} + \int \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cdot \mathbf{L}(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i, \quad (12)$$

式中  $L_e$  为目标自身辐射亮度， $L_r$  为目标表面的反射辐射亮度。

为了计算目标表面辐射率，需要引入了局部热量动态平衡的概念。局部动态平衡首先假设参与辐射和吸收过程中的原子和分子数量可以通过平衡值给出。在这种情况下，即使辐射能量不同于它的平衡值，材料的分布状态是由相同温度下材料的麦克斯韦-玻尔兹曼分布决定的。需要注意的是：假设的平衡是指材料的不同状态，而不是材料本身与周围环境的平衡。因为入射辐射是与表面同温度的热辐射，故总辐射就是相同温度下的黑体辐射。因此有

$$L_{\text{B}} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_0 = L_{\text{B}} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_{\text{surf}} + \int \mathbf{f}_{\text{surf}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) L_{\text{B}} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_0 \cos \theta_i d\Omega_i, \quad (13)$$

则可得出红外偏振辐射率的表达式为

$$\boldsymbol{\epsilon}_{\text{surf}} = \left[ 1 - \int \mathbf{f}_{\text{surf}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i \right] \cdot \boldsymbol{\epsilon}_0 = \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \end{bmatrix}. \quad (14)$$

本文忽略传输路程中的大气辐射,对于不透明的辐射目标,可得入射的斯托克斯矢量  $\mathbf{S}^{\text{in}}$  (即红外偏振辐射控制方程,如图 2 所示)为

$$\mathbf{S}^{\text{in}} = \int \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \cdot \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{surf}} I_{\text{obj}}, \quad (15)$$

式中  $\mathbf{S}$  为入射的 Stokes 矢量,通常情况下认为被动红外成像系统中入射光为自然光,故  $\mathbf{S}$  可以表达为  $\mathbf{S} = [I_{\text{bg}} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。即(15)式可表达为

$$\mathbf{S}^{\text{in}} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \int \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \cdot \begin{bmatrix} I_{\text{bg}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{surf}} I_{\text{obj}} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

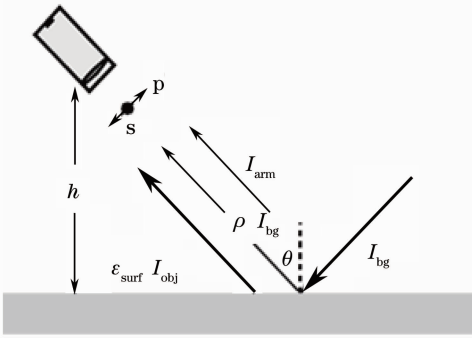


图 2 红外偏振成像辐射传输模型示意图

Fig.2 Radiative transmission illustration of infrared polarization imaging

### 3 材料粗糙度及折射率对红外偏振信息的影响

目标的偏振度、偏振角信息通常都是通过实验获取,目前,国内关于目标的红外偏振特性的分析研究尚处在实验论证阶段,而通过偏振度、偏振角图像也不能得出相关影响参数与偏振信息的关系,且参数对于偏振信息的影响大小也无法描述。通过 2.2.2 节推导得出的偏振辐射控制方程可知目标的 Stokes 矢量可表示为入射、反射角、粗糙度等参数的函数表达式,也就是说即使不通过实验探测,也可以预测目标的红外偏振信息。

#### 3.1 偏振度数学表达式的推导

由(16)式可知目标场景辐射发射的 Stokes 矢量可表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由于 BRDF 是关于材料表面粗糙度、入射天顶角、入射方位角、探测方位角、探测天顶角以及波长的函数,故偏振度及偏振角也可表示为这些参数的函数。通过文献[13]给出  $M_{i,j}$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ ) 的计算公式可以计算出  $M_{00}, M_{10}, M_{20}$  的表达式(关于入射角及反射率,因为  $V$  与左 / 右旋的圆偏振信息有关,由于自然目标的圆偏振分量很小,通常为 0,故此处不对其进行计算)为

$$\begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^2 + r_p^2 \\ \cos(2\eta_r)(r_s^2 - r_p^2) \\ \sin(2\eta_r)(r_p^2 - r_s^2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_p \\ \cos(2\eta_r)(R_s - R_p) \\ \sin(2\eta_r)(R_p - R_s) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中  $R_s, R_p$  为反射率的垂直和平行分量,  $\eta_r, \eta_t$  为将标量 BRDF 偏振化时所引入的四个参考平面之间变换的旋转角 ( $R_s, R_p, \eta_r, \eta_t$  表达式参考文献[14])。将其代入(17)式中计算可得

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} (R_s + R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \cos(2\eta_r) (R_s - R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \sin(2\eta_r) (R_p - R_s) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

由(19)式可知,被测目标的偏振度可以表述为

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{\frac{1}{8\pi\sigma^2} |I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}|}{I_{\text{obj}} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} (R_s + R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}})}.$$

$$\sqrt{\left\{ \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \cos(2\eta_r) (R_s - R_p) d\Omega_r \right\}^2 + \left\{ \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \sin(2\eta_r) (R_p - R_s) d\Omega_r \right\}^2}, \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) = \frac{1}{2} \arctan\left\{ \frac{\int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \cos(2\eta_r) (R_s - R_p) d\Omega_r}{\int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} \sin(2\eta_r) (R_p - R_s) d\Omega_r} \right\}. \quad (21)$$

由上述推导得到了偏振度、偏振角是关于微粗糙度、折射率及入射角等参数的函数,由表达式可知入射角、折射率、目标背景的程度对比度及粗糙度对偏振度、偏振角信息的影响较大。以前关于粗糙度等参数对偏振信息的影响均只通过实验论证,并没有对其进行理论推导。

### 3.2 偏振度关于相关参数的分析研究

为了对表达式进行定性研究,合理假设入射光线与反射光线在同一平面内,那么可以忽略参考平面之间变换的旋转角  $\eta_t$  和  $\eta_r$ , (20)式就可简化为

$$p = \frac{\frac{1}{8\pi\sigma^2} |I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}| \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} (R_s - R_p) d\Omega_r}{I_{\text{obj}} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp[-(\tan^2\theta/2\sigma^2)]}{\cos\theta_i} (R_s + R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}})}. \quad (22)$$

若被测物体表面的光滑度较高时,则可忽略  $\theta$ 。偏振度关于入射角、材料折射率、粗糙度均方差的简化关系表达式就可表示为

$$p = \frac{a |R_s - R_p|}{8\sigma^2 \cos\theta_i \pm a(R_s + R_p)}, \quad (23)$$

式中  $a$  为背景与目标的辐射强度的差值与目标辐射强度的比值。当背景辐射强度大于目标辐射强度(表示为反射偏振)时, (23)式表示为

$$p = \frac{a |R_s - R_p|}{8\sigma^2 \cos\theta_i + a(R_s + R_p)}, \quad (24)$$

当目标的背景辐射强度大于背景辐射强度(表示为

辐射偏振)时, (23)式表示为

$$p = \frac{a |R_s - R_p|}{8\sigma^2 \cos\theta_i - a(R_s + R_p)}. \quad (25)$$

根据(24)式可以得出:当背景辐射大于目标辐射时,偏振度随材料粗糙度及折射率不同的变化曲线,如图3所示。图3为折射率为  $\bar{n} = 1.65 + 0.1i$  的材料在不同粗糙度的情况下的偏振度曲线。从图中可以看出材料表面的粗糙度对偏振度的影响较大,材料表面越光滑其偏振度越高,此结论与很多文献由实验得出的结论相同。

图4(a), (b)分别为参考文献[14]中材料锆的

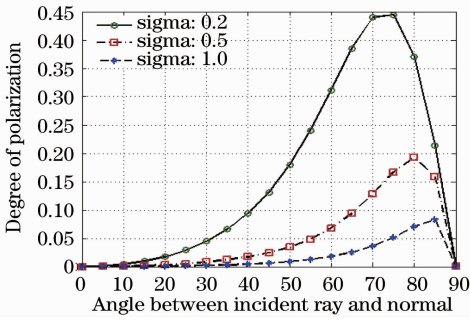


图 3 不同粗糙均方根差情况下偏振度  
Fig. 3 Degree of linear polarization at different roughness parameter

实测偏振度值与通过本节简化(24),(25)式计算得到的偏振度比较曲线图,其中材料锗的折射率为 $\bar{n}=4$ 。图 4(a)为由(24)式仿真得出的偏振度曲线与文献中实际测量的反射时偏振度值的拟合曲线,图中标记为“o”的偏振度曲线为本文的仿真偏振度随入射角变换的拟合曲线,标记为“□”的偏振度曲线为由菲涅耳公式得出的完全反射时的偏振度曲

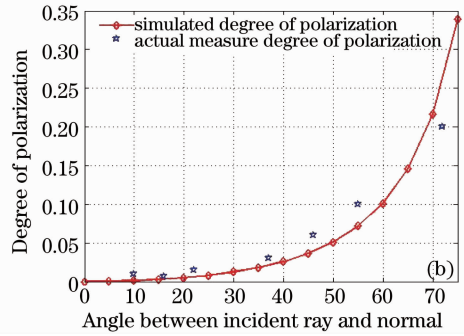
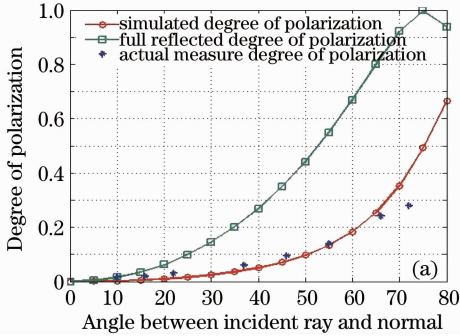


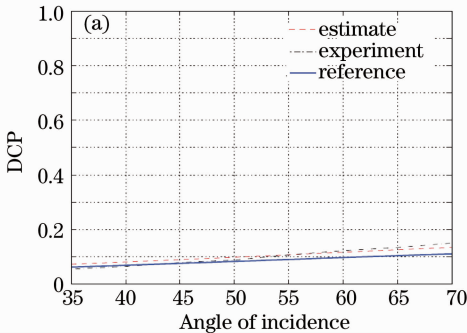
图 4 材料锗的实测与简化式计算偏振度拟合曲线

Fig. 4 Measured degree and simulated degree of polarization for germanium

若 $I_{obj}=0$ ,即完全考虑反射情况时,则线偏振度的表达式可以简化为

$$p = \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \quad (26)$$

(26)式与文献[15,16]中的推导得出的偏振度公



式(反射时)完全相同。图 5 为折射率为 $\bar{n}=0.54+3.19i$ 的铜材料的偏振度曲线。其中图 5(a)为文献[16]中折射率为 $\bar{n}=0.54+3.19i$ 材料铜的偏振度实测及计算所得曲线,可以看出实测曲线与其计算所得

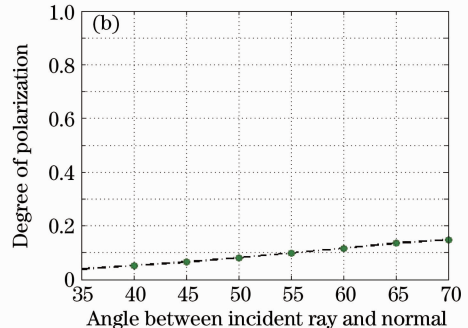


图 5 折射率为 $\bar{n}=0.54+3.19i$ 材料铜的偏振度曲线

Fig. 5 Polarization degree curve of copper which refractive index is  $\bar{n}=0.54+3.19i$

曲线的吻合度较高(反射角固定为  $60^\circ$ ),图 5(b)为由本文简化(24)式计算所得(反射角为对整个反射半球面取积分),比较图 5(a),(b)可以看出:图 5(b)对应于各入射角的偏振度值与图 5(a)基本相同。由此我们认为:反射角对于偏振度的影响较小,折射率对于偏振度而言是比较重要的影响因素。

综上所述,基于双向分布反射函数推导得出的红外偏振辐射控制方程可以完全描述目标场景的红外偏振状态,且由其推导得出的偏振度关系式正确反映了目标表面粗糙度及材料折射率对偏振度的影响,通过表达式可对参数的影响进行定性定量的研究,这将为实现基于红外热偏振成像的目标探测提供理论指导。由于本文假设材料的光滑度较高,并忽略  $\theta$ ,偏振角趋近于定值: $\alpha = \pi/4$ 。需要注意得是:本文考虑的是平面的情况,而实际探测情况往往比较复杂,本文主要在较理想的情况下进行定性的分析。(20),(21)式具有一般性,根据不同的偏振双向分布函数模型均可以推导出偏振度、偏振角的表达式。

## 4 结 论

目前常用的求解热红外偏振信息的方法就是通过旋转偏振器件或者波片获取方向为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  的目标场景偏振热图像,然后通过通过对这几幅图像进行计算得到辐射物体的 Stokes 参数图像(即  $I, Q, U, V$ )以及偏振信息图像(偏振角、偏振度),但是对于具体参数对偏振信息的影响都只是通过实验来总结。通过偏振双向反射分布函数模型推导了红外发射率模型和红外热偏振成像辐射控制方程,得出了偏振信息关于粗糙度、折射率的数学表达式,并对参数的影响进行了定性的研究,这将为实现基于红外热偏振成像的目标探测提供理论指导。但是由于计算模型是基于微面元法线的双向反射分布函数建立的,微面元双向反射分布函数并没有考虑漫反射及体散射等非偏振量对辐射控制方程的影响,而通常实际探测环境通常比较复杂,漫反射等不可以忽略,所以还需要考虑红外偏振双向分布函数广义模型,这将在后续的研究工作中完成。

## 参 考 文 献

- Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 45~63
- 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 45~63
- Nie Jingsong, Wang Zhen. Summarize of infrared polarization imaging detection technology[J]. *Infrared Technology*, 2006,

- 28(2): 63~67
- 聂劲松, 汪 震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. *红外技术*, 2006, 28(2): 63~67
- Xu Canjun, Zhao Jinsong, Cai Yi *et al.*. A summary of the mechanism of infrared polarization imaging [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(7): 381~385
- 徐参军, 赵劲松, 蔡 毅等. 红外偏振成像机理概述[J]. *红外技术*, 2007, 29(7): 381~385
- J. Scott Tyo, Dennis L. Goldstein, Oavid B. Chenalt *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(22): 5453~5469
- Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 290~294
- 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 Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. A hybrid model of polarized BRDF for painted surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 962~966
- 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多参量混合模型[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 962~966
- Sun Wei, Liu Zhengkai, Shan Lie. Manmade objects recognition with polarization information [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(3): 267~269
- 孙 玮, 刘政凯, 单 列. 利用偏振技术识别人造目标[J]. *光学技术*, 2004, 30(3): 267~269
- Michael G. Gartley. Polarimetric Modeling of Remotely Sensed Scenes in the Thermal Infrared [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2007. 55~61
- Tang Kun, Zhou Jiwei, Jiang Tao *et al.*. IR polarization properties of a target and its background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 611~614
- 唐 坤, 邹继伟, 姜 涛等. 目标与背景的红外偏振特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 611~614
- Wang Zhen, Hong Jing, Ye Song *et al.*. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1500~1503
- 汪 震, 洪 津, 叶 松等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(8): 1500~1503
- Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Chaohui *et al.*. Application of polarization remote sensing in camouflage detection and method of polarization stealth[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 553~556
- 张朝阳, 程海峰, 陈朝辉等. 偏振遥感在伪装目标识别上的应用及对抗措施[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4): 553~556
- Richard G. Priest, Thomas A. Germer. 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, 2000, 1: 169~181
- K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, 57(9): 1105~1114
- James D. Howe, Miranda A. Miller, Robert V. Blumer *et al.*. Polarization sensing for target acquisition and mine detection[C]. *SPIE*, 2000, 4133: 202~213
- Vimal Thilak, Charles D. Creusere, David G. Voelz. Estimating the complex index of refraction and view angle of an object using multiple polarization measurements [C]. Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2006: 1067~1071
- Vimal Thilak, David G. Voelz, Charles D. Creusere. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(30): 7527~7536