

基于目标边缘轮廓偏振特征的姿态分析初探

陈伟力¹, 孙秋菊², 王淑华¹, 武敬力¹, 陈艳¹, 李军伟¹, 许元男¹

(1. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室 北京 100854;

2. 信阳师范学院 物理电子工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 通过微面元理论的函数模型, 基于红外偏振辐射传输方程, 推导分析红外偏振角与目标表面折射率、反射率及探测角度等关系的数学模型, 通过合理简化模型仿真得出偏振角随入射角的单调变化曲线; 开展红外偏振成像试验, 试验数据分析与仿真结果一致, 这表明: 目标边缘轮廓的偏振角特征与探测波长的相关性可以忽略, 在目标与背景辐射相差较小的情况下, 采用光谱辐射亮度对比度的方法无法区分目标, 而通过偏振角对比度可以明显区分目标边缘特征, 并提出通过基于目标几何特征以及探测位置, 反演解算目标的姿态信息的新方法。

关键词: 红外偏振成像; 红外偏振传输方程; 偏振角特征; 姿态分析

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Gesture analysis based on the polarization characteristics for the target edge contour

CHEN Wei-Li¹, SUN Qiu-Ju², WANG Shu-Hua¹,

WU Jing-Li¹, CHEN Yan¹, LI Jun-Wei¹, XU Yuan-Nan¹

(1. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100854, China;

2. Physics and Electronic Institute of Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The mathematical model of the relationship between infrared polarization angle and other parameters such as surface refractive index, reflectivity, and the detection angle was derived, based on the equation of infrared polarized radiation through micro-facet theory. Reasonable simplification for the model was made in simulation. The curve show that the polarization angle changes with the incident angle monotonously, in agree with the experimental results. It is concluded that the correlation between the polarization angle characteristics of the target edge contour and the detection wavelength can be neglected. It is difficult to distinguish between target and background by spectral radiance contrast when they have small radiation difference. While the target edge features can be obtained from the polarization angle contrast. A new method to calculate target gesture information was proposed based on geometry features of the target and the relative detection position.

Key words: infrared polarization imaging, equation of infrared polarized radiation, angle of polarization, gesture analysis

PACS: 42.25.Ja

引言

从实际应用来讲, 地表及大气目标在反射、散射和透射电磁辐射过程中, 会产生目标本征属性所决定的偏振信息^[1], 测量并分析这些偏振信息, 可以反演目标的本征属性。通常, 偏振信息可以用来表征

目标的物理和化学特性。例如, David B Chenault^[2]等在实验室研究目标通过散射介质的偏振成像特性, 结果表明: 在散射介质中, 归一化的偏振度参数表征目标的表面状态信息, 能够改善对比度。Miranda A Miller^[3]等研究了自然背景与汽车等目标的偏振特性, 特别指出汽车等目标和自然背景偏振角参

收稿日期: 2015-10-15, 修回日期: 2016-04-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (613225)

Foundation items: Supported by National Program on Key Basic Research Project of China (613225)

作者简介 (Biography): 陈伟力 (1979-), 女, 山西临汾人, 博士, 主要从事红外成像及其图像处理方面的研究。E-mail: weili1002@bit.edu.cn

Received date: 2015-10-15, revised date: 2016-04-01

数图像的差异.从偏振探测已有的研究基础来看,偏振信息解译是一个关键的研究过程.通过实验室和野外偏振成像试验,对获取的实验数据进行处理和分析,发现在仪器响应动态范围内,偏振态参数受光强影响较小,特别是以偏振角参数图像显示景物状态特征,能够较好地表征目标边缘轮廓特征.

本文基于偏振微面元理论散射函数模型,推导红外偏振辐射传输方程的 Stokes 表达式,得出红外偏振角关于目标表面粗糙度、折射率、入射和观测角度等多参数的数学模型;并开展了实验室内和室外红外偏振成像试验,对获取的实验数据进行处理和分析.结果表明:基于目标边缘轮廓的偏振角参量与波长相关性较小,且能够较好地表征目标边缘特征信息,同时提出可通过偏振角特征推算反演目标的姿态信息,对偏振成像技术的深入研究具有理论指导意义.

1 偏振角定义及常用数学表示方法

一般光源所发出的光是非偏振光,光与物质相互作用之后,出射辐射通常具有一定程度的偏振特性,其变化与物质的本征属性有关.通常描述光波偏振态的方法有两种^[4]:(①琼斯矢量表示法,通过琼斯矢量表示某电场矢量的 x 、 y 分量,其与电场的振幅及相位相关,在偏振光发生干涉效应时,通常选用琼斯矢量法计算,但琼斯矢量不能描述自然光和部分偏振光,当需要描述光的任意偏振态时,不适用琼斯矢量法.(②Stokes 矢量表示法,可描述完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光,其主要通过 4 个 Stokes 参量来描述光波的偏振态和强度,通用表达式为: $\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,参量 S_0 与入射光强有关; S_1 与 0° 和 90° 方向的线偏振信息有关; S_2 与 45° 和 135° 方向的线偏振信息有关; S_3 与左/右旋的圆偏振信息有关,通常自然目标的圆偏振分量很小,故可忽略不计.由于 Stokes 参量具有强度量纲,故在实际探测中,可直接通过探测器探测不同偏振方向的辐射强度图像来计算 Stokes 参量,即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 I_θ ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) 为偏振片旋转 θ 时的热图像. I_{RCP} 和 I_{LCP} 分别表示右旋和左旋圆偏振.

Stokes 参量主要用来描述光束的偏振态,但不

能完整描述目标景物反射及辐射的偏振态变化与其表面状态和固有属性的密切关系.目前,常用的两个表征目标景物表面状态和属性特征的重要参量为偏振度 p (degree of linear polarization, DOLP) 和偏振角 α (angel of linear polarization, AOLP). 其中偏振角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,就是能量最大的偏振方向与 x 轴的夹角,可以用来表征目标及背景的状态特征.偏振角可表示为 Stokes 参量的函数,计算公式如下

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{S_2}{S_1} \right]. \quad (2)$$

2 基于红外偏振辐射传输方程的偏振角特性分析

2.1 基于微面元理论的红外偏振辐射传输方程

对于不透明的辐射目标,其表面的发射辐射主要由背景反射和自身辐射组成.图 1 为红外偏振成像辐射传输模型示意图.

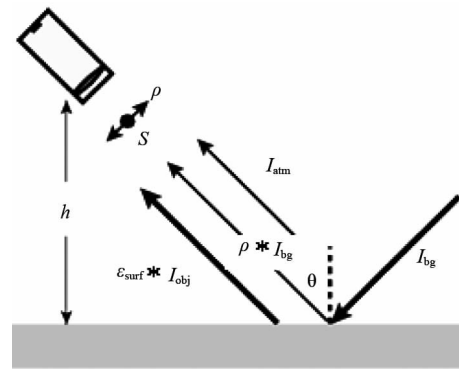


图 1 红外偏振成像辐射传输模型示意图
Fig. 1 Radiate transmission model of infrared polarization

假设入射到偏振器件前的 Stokes 矢量记为 \mathbf{S}^{in} , 经过偏振器件后的 Stokes 矢量记为 \mathbf{S}^{out} , 则对于红外偏振成像系统,两者之间存在线性的转换关系,如下式

$$\mathbf{S}^{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}^{\text{in}}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{M} 表示偏振器件的穆勒矩阵.在红外偏振成像实验中,通过偏振成像系统获取并计算得出的 Stokes 矢量就是所谓的 \mathbf{S}^{in} , 即红外偏振辐射传输方程的 Stokes 表达式.由图 1 可知:场景表面的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{in} 可表示为对太阳及天空背景的反射 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{r} 与其自身发射辐射 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{e} 之和,即 $\mathbf{S}^{\text{in}} = \mathbf{S}^{\text{r}} + \mathbf{S}^{\text{e}}$. 这里需要双向反射分布函数 (BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function) 来求解.

根据红外偏振成像辐射传输模型可知,对于不透明的辐射物体其入射到红外线栅偏振片前的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{in} 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^{\text{in}} &= \mathbf{S}^{\text{r}} + \mathbf{S}^{\text{e}} \\ &= \int \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \cdot \mathbf{S}^{\text{i}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{surf}} \cdot \mathbf{I}_{\text{obj}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \mathbf{S}^{i} 为入射光 Stokes 矢量, \mathbf{I}_{obj} 为目标的辐射强度, \mathbf{f} 为基于微面元理论的 Priest-Gerber 模型, 图 2 为定义 BRDF 坐标的几何角度关系, 图 3 为微面元模型的角度关系. 论文基于目标本体坐标系定义, 观测空间为相对于基准面的场景探测; 入射方位表示相对于目标材料表面的辐射及反射入射; 观测方位表示探测器表面相对于目标表面的观测方位.

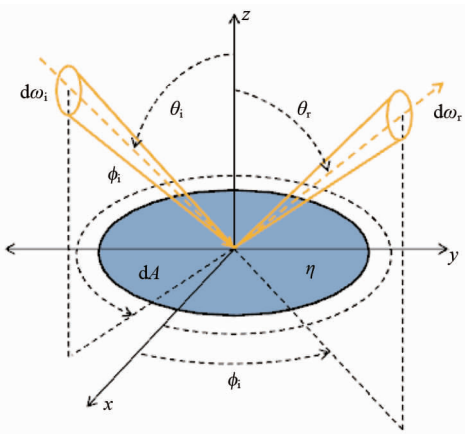


图 2 BRDF 几何关系图
Fig. 2 Map for geometry relation of BRDF

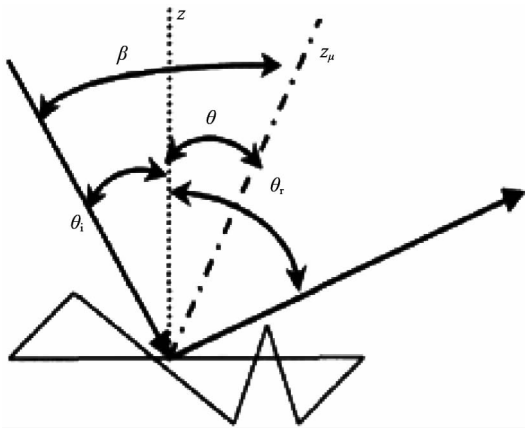


图 3 微面元模型的角度关系
Fig. 3 Angle relation of Micro-surface model

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \\ &= \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i) \cos(\theta_r)} \mathbf{M}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 σ 表示目标表面的粗糙程度, 其值越小表示目标表面越光滑; θ 为微面元法线 z_μ 与目标表面法线 z 的夹角, ϕ 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), β 为入射方向与微面元法线 z_μ 之间的夹角. $\theta, \theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \beta$ (下标 i, r 分别表示入射和反射)之间满足^[5]

$$\cos \theta = \frac{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}{2 \cos \beta} \quad (6)$$

$$\cos(2\beta) = \cos(\theta_i) \cos(\theta_r) + \sin(\theta_i) \sin(\theta_r) \cos(\phi_r - \phi_i) \quad (7)$$

假设被动红外成像系统中入射光为自然光, 即 \mathbf{S}^{i} 可表示为: $\mathbf{S}^{\text{i}} = [I_{\text{bg}} \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 则式(4)可表示为

$$\mathbf{S}^{\text{in}} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由上式可知, 场景表面的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{in} 与 f_{00}, f_{10}, f_{20} 密切相关, f_{00}, f_{10}, f_{20} 可由菲涅耳反射穆勒矩阵 $\mathbf{M}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 中的 m_{00}, m_{10}, m_{20} 计算得出(通常忽略 S_3 参数, 故略去 m_{30} 求解), 通过 $M_{i,j}$ ($i, j = 0, 1, 2, 3$) 的计算式可以计算出 m_{00}, m_{10}, m_{20} 为

$$\begin{bmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^2 + r_p^2 \\ \cos(2\eta_i)(r_s^2 - r_p^2) \\ \sin(2\eta_i)(r_p^2 - r_s^2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_p \\ \cos(2\eta_i)(R_s - R_p) \\ \sin(2\eta_i)(R_p - R_s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, η_i, η_r 为将标量 BRDF 偏振化时所引入的参考平面之间变换的旋转角; R_s, R_p 为菲涅耳反射率的垂直和平行分量. m_{00} 表示为偏振分量 s, p 的菲涅耳反射率 R_s, R_p 之和, m_{10}, m_{20} 分别表示偏振分量 s, p 的菲涅耳反射率 R_s, R_p 之差与两倍入射参考平面变换的旋转角 η_i 的余弦值、正弦值的乘积, η_i 的计算表达式为

$$\cos(\eta_i) = \frac{\cos(\theta) - \cos(\theta_i) \cos(\beta)}{\sin(\theta_i) \sin(\beta)} \quad (10)$$

将 m_{00}, m_{10}, m_{20} 代入式(8)可得

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} (R_s + R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \sin(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_r (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由此可知,目标的红外偏振特性与表面折射率、入射角、反射角、粗糙度等多种因素相关,同时也与目标背景的辐射强度密切相关.

由偏振角的定义及式(11)可推导得出基于偏振 BRDF 模型的偏振角可表述为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = \frac{1}{2} \arctan\left\{ \frac{\int \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \sin(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_r}{\int \frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp(-(\tan^2 \theta / 2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_r} \right\} \quad (12)$$

假设材料的光滑度较高(忽略 θ),上式简化为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = \frac{1}{2} \arctan\left\{ - \frac{\int \sin'(2\eta_i) d\Omega_r}{\int \cos'(2\eta_i) d\Omega_r} \right\} \quad (13)$$

式中 $\cos'(2\eta_i)$ 、 $\sin'(2\eta_i)$ 为简化公式,如下

$$\sin'(2\eta_i) = \frac{2[2 - \cos\theta_i(\cos\theta_i + \cos\theta_r) \cdot |\cos\theta_i - \cos\theta_r|]}{4 - (\cos\theta_i + \cos\theta_r)^2} \quad (14)$$

$$\cos'(2\eta_i) = \frac{2[2 - \cos\theta_i(\cos\theta_i + \cos\theta_r)]^2}{4 - (\cos\theta_i + \cos\theta_r)^2} - \sin^2\theta_i \quad (15)$$

将 $\cos'(2\eta_i)$ 、 $\sin'(2\eta_i)$ 代入式(13),则有

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = \frac{1}{2} \arctan\left\{ \frac{\int \frac{2[2 - \cos\theta_i(\cos\theta_i + \cos\theta_r) \cdot |\cos\theta_i - \cos\theta_r|]}{4 - (\cos\theta_i + \cos\theta_r)^2} d\Omega_r}{\int \left[\frac{2[2 - \cos\theta_i(\cos\theta_i + \cos\theta_r)]^2}{4 - (\cos\theta_i + \cos\theta_r)^2} - \sin^2\theta_i \right] d\Omega_r} \right\} \quad (16)$$

对式子进行积分运算得出偏振角与入射天顶角的关系式,忽略圆偏振参量情况下,目标以及基础材质的反射及辐射对偏振角特征影响很小,可忽略不计,则影响目标以及基础材质的偏振角特征的主要参数为入射角和表面粗糙度.图4为偏振角随入射角变化的仿真曲线,目标表面的偏振角随着入射光线与目标表面法线夹角的增大而单调减小.由此可知,当目标表面有划痕或凹凸不平时,则其表面法线发生变化,从而致使凹凸不平处与周围入射角不同,所以通过目标的偏振角图像可检测目标表面凹凸状态等.

为验证偏振角与波长之间的关系,实验室对基

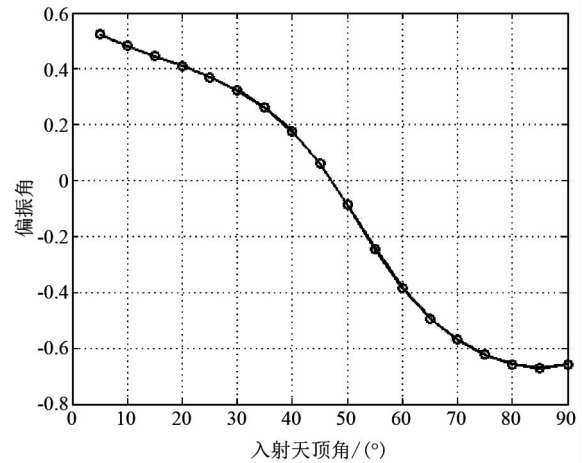


图4 偏振角随入射天顶角变化的曲线图

Fig. 4 The change of angle of linear polarization with incidence zenith

于微面元理论的反射偏振特性进行了分析研究,由于偏振反射传输模型的 Stokes 矢量 S^{in} 为 $S^{in} = S^r = \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \cdot S^i$,其中 S^i 为入射光 Stokes 矢量,通常情况下认为被动成像系统中入射光为自然光,故 S^i 的表达式为: $S^i = [I_{bg} \ 0 \ 0 \ 0]^T$.进而可得出反射偏振传输方程的 Stokes 表达式,通过计算可得反射偏振传输状态下偏振角的计算表达式,与式(16)一致.也就是说,目标在同一平面内的边缘偏振角特征随入射角的变化呈单调变化的趋势,且与探测波长相关性较小.

2.2 红外偏振成像实验及数据分析

为了验证目标边缘轮廓的偏振角特性,实验室开展了有针对性的红外偏振成像试验研究,意在通过实验理解目标的红外辐射偏振特性.试验中使用的热像仪为 SC7750 测温热像仪,焦平面探测器像元数 640×512 ,像元尺寸 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,工作波段范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,A/D 量化精度 14bit;偏振器件为英国 SPECAC 公司 BaF₂ 的金属线栅偏振片为检偏器, BaF₂ 在 $2 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段范围内均有高透过率.实验环境温度约 32°C ,被测目标为带手持凹槽的玻璃杯,通过在杯中加热水使得目标背景的对比度产生差异.杯中水温约 80°C 左右,热像仪与被测目标的距离约为 2 m .图5分别给出盛有热水的杯子常规热图像及由偏振图像获得的三个 Stokes 参量图像.可以看出:常规热图像以及 S_0 图像中虽然杯子边缘由于温差较大显得比较清楚,但杯子手持凹槽则几乎是观测不到的;而在 S_1 和 S_2 图像中不仅边缘得到提取,且杯子手持凹槽明显可见.

由 2.1 节可知,偏振角随入射天顶角呈单调变

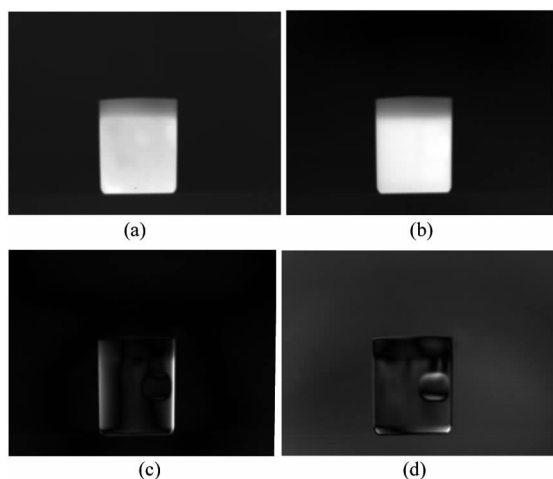


图5 被测目标强度图及 Stokes 参数图 (a) 无偏振图像, (b) S_0 参数图像, (c) S_1 参数图像, (d) S_2 参数图像
Fig. 5 Image intensity with different Stokes parameters for a cup filled with hot water (a) no polarization image, (b) S_0 parameter image, (c) S_1 parameter image, (d) S_2 parameter image

化趋势,通过图6盛热水的玻璃杯的偏振度和偏振角图像可以看出:偏振度图像反映了目标外形轮廓,但对水面辐射信息不敏感;偏振角图像反映了玻璃杯的表面与凹槽处的相位差。

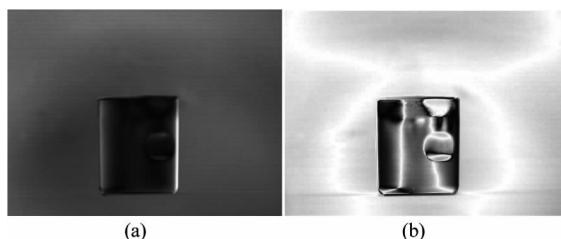


图6 被测目标的偏振信息图 (a) 偏振度图像, (b) 偏振角图像
Fig. 6 The polarization diagram for the target (a) image pictured by the degree of polarization, (b) image pictured by the angle of polarization

3 基于边缘轮廓偏振角特征的目标姿态分析

为了进一步研究目标偏振角特征,实验室对红外辐射标准板开展了中、长波红外偏振成像试验研究.图7为红外偏振试验测试场景图,图8为红外辐射标准板可见光图像。

图9为红外发射率标准板分别在中、长波段范围的偏振角图像,由图可知,红外发射率标准板左侧边缘的偏振角在中、长波段范围内均为 20° 左右,右侧边缘的偏振角在中、长波段范围内均为 30° 左右,通过试验结果证明目标边缘偏振角与波长



图7 红外偏振测试场景图
Fig. 7 Scene of IR polarization imaging

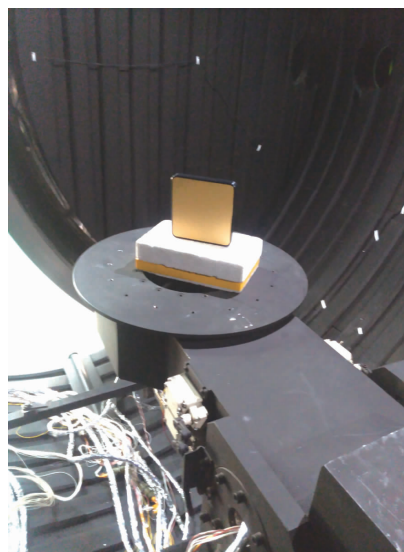


图8 红外辐射标准板可见光图像
Fig. 8 Optical image of infrared standard board

相关性较小,故基于目标边缘偏振角特征的探测方法可作为目标姿态分析的主要特征。

鉴于目标边缘偏振角特性在姿态识别中的作用,实验室开展了目标模型的红外偏振成像试验研究.试验中通过加热模型头部提高目标背景的对比度:试验环境温度为 30°C ,目标模型头部温度为 40°C .图10为根据试验数据计算得出在探测角度为 0° 时,模型在中、长波段范围的偏振角图像.由图可知,虽然模型头部摆放位置与探测系统成 0° ,但由于模型头部为锥体边缘轮廓,对于微平面而言,微面元法线与探测平面法线之间的夹角就不是 0° ,由于

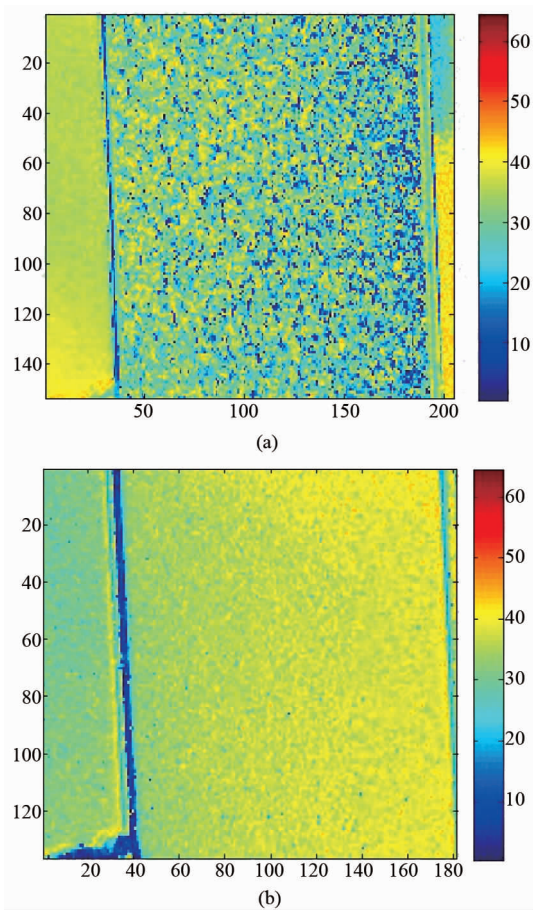


图9 红外标准板—偏振角图像 (a) 中波红外, (b) 长波红外
 Fig.9 Images viewed with the angle of polarization for the infrared standard board (a) medium wave infrared, (b) long wave infrared

模型头部呈锥体形状,故图中模型头部边缘轮廓-直角坐标线区域偏振角值比中心以及四象限位置偏振角小,根据数据计算结果可知:直角坐标线区域偏振角约为 10°左右,而中心及四象限位置处约为 30°;且由图 10(a)、(b)可知,在相同场景、相同测试条件下,模型头部边缘轮廓在中、长波,偏振角特征几乎完全相同,试验分析结果表明:基于红外辐射偏振传输方程计算得出的偏振角关于探测角度变化以及偏振角特征与探测波长不相关结论的正确性.

仍以锥体模型作为姿态分析的目标,设计锥体模型在不同探测方向的高光谱偏振特性测量试验,为了提高目标背景的对比度,试验中加热锥体模型的头部:试验环境温度为 30℃,锥体目标模型头部温度为 40℃.图 11 为锥体模型在不同探测方向下对应的中波红外偏振角图像.由图可知:在不同探测方向锥体目标姿态虽然发生变化,但目标边缘轮廓

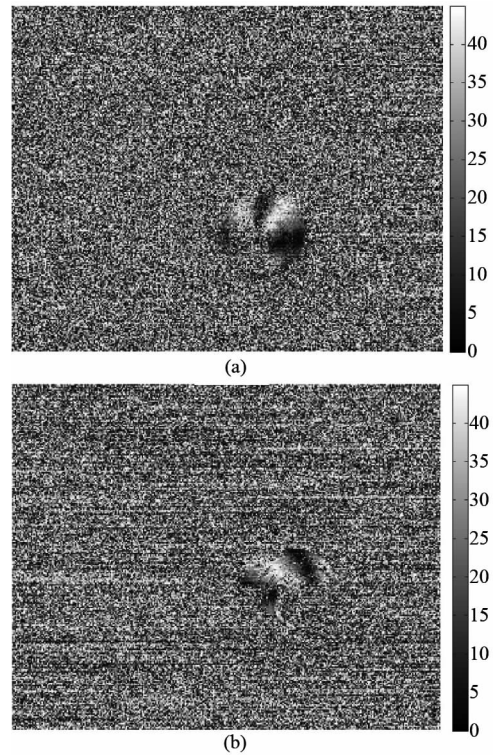


图 10 锥体模型中、长波红外偏振角特征图(正迎头方向探测) (a) 中波, (b) 长波
 Fig.10 Infrared angle of polarization characteristic images of a cone mode (a) medium wave, (b) long wave

的偏振角特征稳定.数据计算结果与图 10 中取值基本一致:以锥体头部正迎头方向为基准坐标,直角坐标线区域偏振角约为 10°左右,而中心及四象限位置处约为 30°.图 12 为在锥体模型不同探测方向时

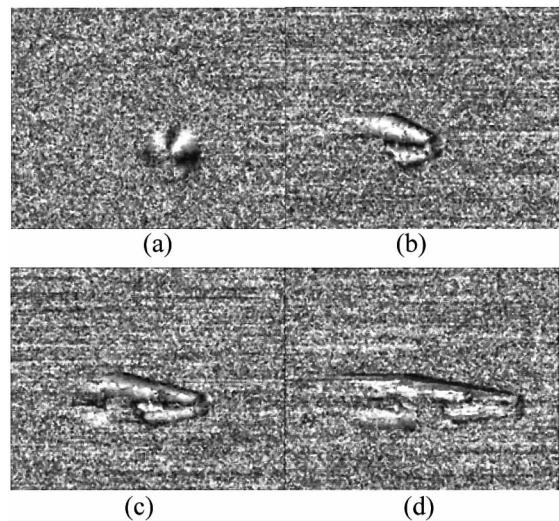


图 11 某锥体模型在不同探测方向中波红外偏振角图像 (a) 0°, (b) 30°, (c) 60°, (d) 90°
 Fig.11 Mid-wave infrared angle of polarization images of a cone model in different detection directions (a) 0°, (b) 30°, (c) 60°, and (d) 90°

中长波高光谱边缘轮廓偏振角特征数据分析结果,其中光谱偏振角对比度 $C_\alpha(\lambda)$ 的计算过程定义为(计算分析以目标模型边缘轮廓偏振角为计算主体):

$$C_\alpha(\lambda) = \frac{\alpha_\lambda(40) - \alpha_\lambda(30)}{\alpha_\lambda(30)} \quad (17)$$

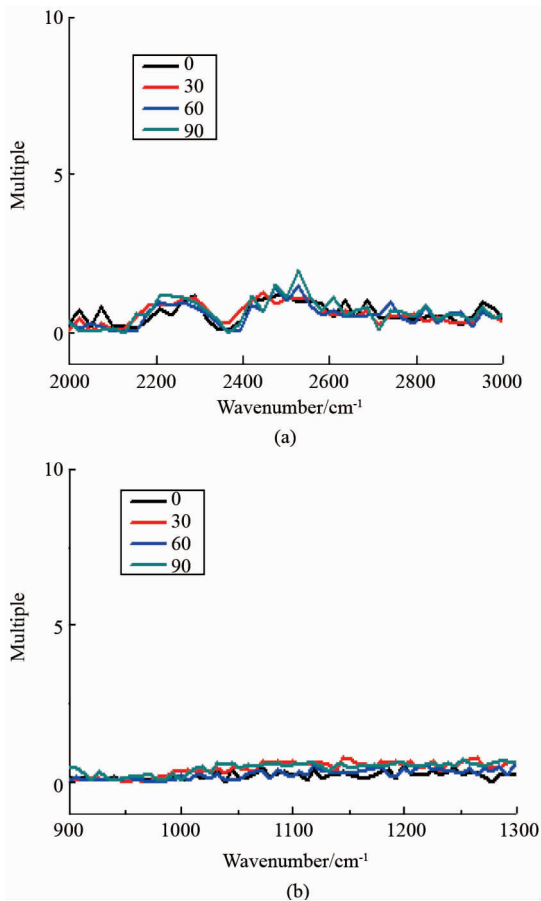


图 12 某锥体模型边缘轮廓在不同探测方向中长波高光谱偏振角变化趋势图 (a) 中波, (b) 长波
Fig. 12 Change trend charts of infrared high spectral polarization angle of a cone model in different detection directions (a) medium wave, (b) long wave

实验现象及初步结果不仅验证了探测方向对目标光谱偏振特性的影响,同时数据分析也验证了目标在不同姿态时边缘轮廓偏振角的取值稳定性,故可根据目标边缘轮廓在不同姿态对应的偏振角特征与基准坐标之间的计算分析,初步确定目标姿态,进而为后续探测积累有效的特性数据集。

为了进一步讨论验证偏振角特征,试验室还开展了目标模型在不同姿态条件下的红外高光谱偏振成像试验研究,图 13 为实验室红外高光谱偏振成像试验场景图及球状模型的可见光图像。试验中使用的 FIRST 中/长波红外高光谱成像仪采用傅里叶变

换技术,在实现中波 $1.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 和长波 $8 \sim 11 \mu\text{m}$ 高分辨率光谱探测的同时,实现 320×256 分辨率的空间成像。试验通过调整锥体模型,从而达到改变探测角度的目的。实验以锥体模型及球状模型作为探测目标进行研究,实验环境及球状模型温度为 30°C ,锥体目标模型头部温度为 40°C 。图 14 为在不同探测方向锥体模型与球状模型的光谱辐射亮度对比度及偏振角对比度在长波波段范围内变化趋势图,计算分析以目标模型边缘轮廓偏振角为计算主体,其中光谱辐射亮度对比度 $C_L(\lambda)$ 以及偏振角对比度 $C_\alpha(\lambda)$ 的计算过程定义为:

$$C_{L(\lambda)} = \frac{L_\lambda(\text{zhui}) - L_\lambda(\text{qiu})}{L_\lambda(\text{qiu})};$$

$$C_{P(\lambda)} = \frac{\alpha_\lambda(\text{zhui}) - \alpha_\lambda(\text{qiu})}{\alpha_\lambda(\text{qiu})} \quad (18)$$



图 13 实验室红外高光谱偏振成像试验场景图
Fig. 13 Scene image of infrared high-spectrum polarization imaging in laboratory

图 14 中锥体模型方向 1、2 分别表示为以正迎头探测为 0° ,方向 1 为锥体模型头部平面与探测系统平面成 30° 夹角,方向 2 为锥体模型头部平面与探测系统平面成 45° 夹角,实验中定义顺时针方向为正向转动。由于球状模型为球形,故其探测方向固定。由图 15 可知,当锥体模型目标与球状模型目标辐射温度相差较小时 (10°C),球状模型边缘轮廓与不同姿态锥体目标边缘轮廓的光谱辐射亮度相差非常微小,而球状模型边缘轮廓与不同姿态锥体目标边缘轮廓的偏振角对比度有明显差异。其中锥体模型处于方向 1 时,锥体与球状模型的偏振度对比度在被测波段范围内变化相对稳定,但当锥体模型处于方向 2 时,锥体与球状目标的偏振度对比度在被测波段范围 $9.3 \sim 9.5 \mu\text{m}$, $10.1 \sim 10.4 \mu\text{m}$ 处有较大提升。由此可知,基于目标边缘轮廓的偏振角特征可反演目标的姿态位置信息,可以通过已知探测位置、

探测距离以及基准平面之间的关系来解算目标在目标本体坐标系的位置。

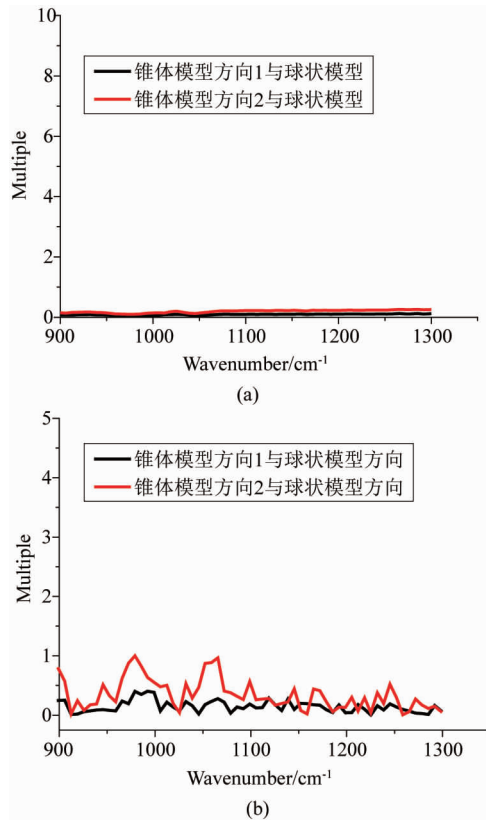


图 14 目标模型边缘轮廓长波红外偏振角对比度曲线图 (a) 光谱辐射亮度对比度, (b) 偏振角对比度
Fig. 14 Infrared angle of polarization contrast of target models edge contour (a) the contrast of spectrum radiation, (b) the contrast of polarization angle

综合试验验证分析可知:锥体目标边缘轮廓偏振角特征在中、长波波段范围取值稳定;且基于目标几何特征以及探测位置信息,可以反演解算其姿态方位;目标与背景辐射相差较小的情况下,通过光谱辐射亮度对比度无法区分目标,但通过偏振角对比度可以明显区分目标的边缘特征,且偏振角特征与波长相关性较小. 实验室后续将会开展多次试验测试,综合分析目标偏振角特征数据,建立典型空间目标姿态方位偏振角特征数据集,进而模拟建立经验解算公式,可为空间目标姿态探测识别提供技术及数据支撑。

4 结论

理论推导及实验分析结果表明:偏振成像测量对目标边缘特征的取向变化敏感,典型目标与背景表面状态的差异能够引起较大的偏振角变化,同时目标偏振角特征能够表现出不同表面取

向的细节特征,以提高目标的对比度,能够在背景中凸现目标的边缘特征,因此,可以利用偏振角特征进行目标边缘轮廓的特征提取,并通过计算方位特征及目标与基准面之间的对应关系解算目标在本体坐标系下的姿态方位信息;目标边缘轮廓偏振角特征与探测波长相关性较小,可通过大量试验计算获取典型目标边缘轮廓的偏振角特征,进而建立典型目标姿态方位数据集,从而可以作为目标导航的重要数据源。

基于目标边缘轮廓偏振特征的目标姿态方位分析属于较新的研究课题,本文工作旨在探讨偏振特征在目标姿态分析中的研究方法,后续将会继续开展大量试验研究,进一步验证并修正基于红外偏振辐射传输方程的偏振特性数学模型. 研究成果有利于提高目标识别效率、增强场景感知,可方便地应用于目标探测、识别,还可扩展到目标隐身、目标导航、空间探测、材料特性研究等领域。

References

- [1] SUN Xiao-Bing, HONG Jin, QIAO Yan-Li. The Study of method for feature extraction based on angle of polarization parameter image[J]. *Remote Sensing Technology And Application* (孙晓兵, 洪津, 乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究. *遥感技术与应用*), 2005, **20** (2): 256 - 260.
- [2] Chenault D B, Larry P J. Polarization imaging through scattering media [J]. *SPIE*, 2000, **4133**: 124 - 133.
- [3] Miller M A, Blumer R V, Howe J D. Active and passive swir imaging polarimetry [J]. *SPIE*, 2001, **4481**: 87 - 99.
- [4] SUN Wei, LIU Zheng-Kai, SHAN Lie. Manmade objects recognition with polarization information [J]. *Optical Technique*. (孙玮, 刘政凯, 单列. 利用偏振技术识别人造目标. *光学技术*), 2004, **30** (3): 267 - 269.
- [5] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared [D]. Rochester Institute of Technology. 2007: 55 - 61.
- [6] Erbach P S, Pezzaniti J L, Chenault D B, et al. Design and performance of a polarized IR scene generator [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6972**: 69720Z - 1 ~ 69720Z - 11.
- [7] Priest R G, Meier S R. Polarimetric microfacet scattering theory with application to absorptive and reflective surface [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41** (5): 988 - 993.
- [8] MA Shuai, BAI Ting-Zhu, CAO Feng-Mei, et al. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance distribution function model [J]. *Acta Optical Sinica* (马帅, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 基于双向分布反射函数模型的红外偏振仿真, *光学学报*), 2009, **29** (12): 3357 - 3361.
- [9] CHEN Wei-Li, WANG Shu-Hua, JIN Wei-Qi, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization Micro-surface theory [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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, *红外与毫米波学报*), 2014, **33** (5): 507 - 514.