

〈系统与设计〉

目标红外偏振探测原理及特性分析

牛继勇, 李范鸣, 马利祥

(中国科学院上海技术物理研究所 上海市现场物证重点实验室 上海 200083)

摘要: 红外偏振信息的获取扩展了目标信息的维度, 具有广阔的应用前景。与可见光相比, 红外辐射不仅包含反射辐射还包含其自身的自发辐射, 因此在考虑红外偏振特性时, 需要结合目标红外反射辐射以及自发辐射的偏振特性来分析。初步分析了红外自发辐射和反射辐射的偏振特性, 介绍了红外偏振信息的表示方法以及获取方式; 运用一套分时的红外偏振探测系统获取目标偏振信息, 通过对实验数据的分析, 归纳出一些红外偏振探测相对于常规红外探测的优势; 最后结合当前国内红外偏振探测的现状, 分析了偏振探测发展趋势。

关键词: 红外偏振探测; 偏振特性; 偏振度

中图分类号: TN29 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)03-0215-06

The Principle and Characteristics Analysis of IR Polarization Detection

NIU Ji-yong, LI Fan-ming, MA Li-xiang

(Shanghai Institute of Technical Physics of CAS, Shanghai Key Laboratory of Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared polarization increases the dimensions of the target information, and has broad application prospects. Compared with visible light, infrared radiation contains reflected radiation and its own spontaneous emission, so when analyzing the infrared polarization characteristics, we should consider both of them. In this article, we analyzed the IR polarization characteristics of reflected radiation and spontaneous emission preliminarily, and introduced representation and access methods of the infrared polarization information. Through the analysis of experimental data, we summarized some advantages of the infrared polarization detection compared with conventional detection. At last, combining the current development situation of the infrared polarization detection, we analyzed the trends of polarization detection.

Key words: IR polarization detection, polarization characteristics, DOLP

0 引言

红外辐射以横波形式在介质中传输, 电场和磁场相互正交, 并且垂直于红外辐射传播的方向。作为强度探测的有益补充, 偏振探测把可用信息从光强、光谱和空间扩展到光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭率和旋转方向, 从而可以获取更多的介质物理和光学参数, 这对提高目标探测能力具有重要意义。

红外偏振探测作为一种新型的探测手段, 能够有效地弥补传统遥感的不足之处, 能够抑制强度图像中背景杂乱的问题, 可以发现目标更多的细节信

收稿日期: 2013-08-27; 修订日期: 2013-11-05。

作者简介: 牛继勇 (1989-), 男 (汉), 山东省潍坊市人, 博士生, 主要从事红外偏振探测技术研究。

基金项目: 上海市现场物证重点实验室基金资助项目, 编号: 2010XCWZK04; 中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金, 编号: Q-ZY-85。

息, 区分真实目标和虚假目标, 提升图像对比度^[1]。

本文初步分析了红外偏振产生的机理, 对反射起偏以及自发辐射起偏做了初步的分析; 利用一套分时的红外偏振探测系统完成对目标红外偏振信息的采集, 并做了初步的分析, 总结了偏振探测优势, 并结合当前偏振研究的现状, 做出了一些前景预测。

1 红外偏振产生机理

光的偏振是指光矢量的振动相对于光传播方向的不对称性。对在可见光范围内, 我们仅仅需要对光的反射特性进行分析, 在红外光谱波段, 我们不仅要考虑反射辐射还要考虑目标本身的自发辐射偏

振特性。由菲涅耳反射定律和基尔霍夫定律可推知，反射和自发辐射都具有偏振特性。

1.1 反射辐射偏振特性

图1为光滑介质表面反射辐射的光路图，对于反射辐射，由菲涅尔公式：

$$\frac{E_s^r}{E_s^i} = r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1)$$

$$\frac{E_p^r}{E_p^i} = r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (2)$$

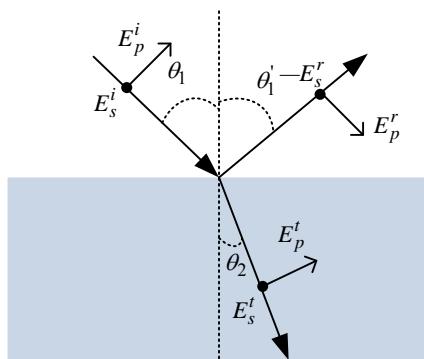


图1 光滑介质表面反射辐射的光路图

Fig.1 The sketch map of infrared reflection light vector

考虑到金属折射率为复数，将折射率代入复数 $\eta=n+ik$ ，则菲涅尔反射系数 $\rho_s(\varphi,n,k)$ 、 $\rho_p(\varphi,n,k)$ 可以由下面公式表示^[2]。

$$\rho_s(\varphi,n,k) = \frac{s^2 + t^2 - 2s \cos(\varphi) + \cos(\varphi)^2}{s^2 + t^2 + 2s \cos(\varphi) + \cos(\varphi)^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_p(\varphi,n,k) &= \frac{s^2 + t^2 - 2s \sin(\varphi) \tan(\varphi) + \sin^2(\varphi) \tan^2(\varphi)}{s^2 + t^2 + 2s \sin(\varphi) \tan(\varphi) + \sin^2(\varphi) \tan^2(\varphi)} \\ &\cdot \rho_s(\varphi,n,k) \end{aligned} \quad (4)$$

其中：

$$s^2 = \frac{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2(\varphi))^2 + 4n^2k^2} + n^2 - k^2 - \sin^2(\varphi)}{2} \quad (5)$$

$$t^2 = \frac{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2(\varphi))^2 + 4n^2k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2(\varphi))}{2} \quad (6)$$

利用反射率可以得到偏振度的表达式：

$$DoLP = \frac{\rho_s(\varphi,n,k) - \rho_p(\varphi,n,k)}{\rho_s(\varphi,n,k) + \rho_p(\varphi,n,k)} \quad (7)$$

由图2反射辐射偏振特性仿真结果知，当红外辐射从光滑的介质表面出射时，由于 p 分量和 s 分量对应的反射率 $\rho_s(\varphi,n,k)$ 、 $\rho_p(\varphi,n,k)$ 有差异，反射光矢量中平行分量以及垂直分量强度会表现出差异，从而引起光的偏振特性。

1.2 自发辐射偏振特性

对于红外自发辐射，由基尔霍夫定律我们知道，在同一温度下目标的光谱发射率等于吸收率 $\alpha(T,\lambda,\varphi)$ ，红外自发辐射光波可以分为平行于入射面的 p 分量和垂直与入射面的 s 分量，根据基尔霍夫定律的描述，我们知道这2个分量对应不同的发射率和吸收率。

$$\varepsilon_p(T,\lambda,\varphi) = \alpha_p(T,\lambda,\varphi) \quad (8)$$

$$\varepsilon_s(T,\lambda,\varphi) = \alpha_s(T,\lambda,\varphi) \quad (9)$$

自发辐射偏振度可以用下面公式表示：

$$DoLP = \frac{\varepsilon_p(T,\lambda,\varphi) - \varepsilon_s(T,\lambda,\varphi)}{\varepsilon_p(T,\lambda,\varphi) + \varepsilon_s(T,\lambda,\varphi)} \quad (10)$$

根据能量守恒可知：

$$\alpha_p(T,\lambda,\varphi) = (1 - \rho_p(\varphi,n,k)) \quad (11)$$

$$\alpha_s(T,\lambda,\varphi) = (1 - \rho_s(\varphi,n,k)) \quad (12)$$

结合公式(8)、(9)、(11)、(12)，由公式(10)得出偏振度：

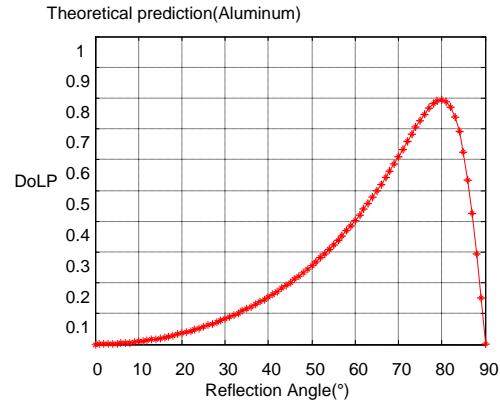
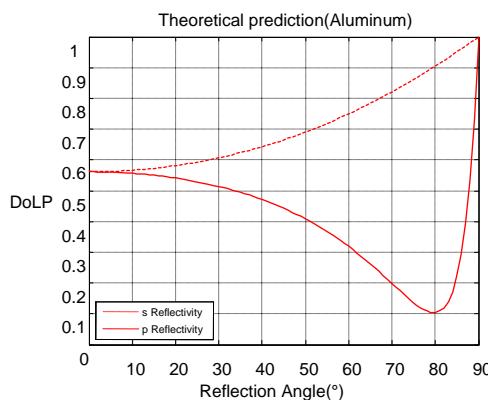


图2 理想光滑铝反射率（左）和反射辐射偏振度（右）仿真关系曲线

Fig. 2 The simulation curves of emissivity (left) and reflection DoLP (right) of ideal smooth aluminum surface

$$\begin{aligned} \text{DoLP} &= \frac{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) - \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)}{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) + \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)} \\ &= \frac{\rho_s(\varphi, n, k) - \rho_p(\varphi, n, k)}{2 - \rho_s(\varphi, n, k) - \rho_p(\varphi, n, k)} \end{aligned} \quad (13)$$

由图3自发辐射偏振特性仿真结果知,当红外辐射从光滑的介质表面出射时,由于 p 分量和 s 分量分量对应的发射率 $\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi)$, $\varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)$ 有差异,红外辐射光矢量中平行分量以及垂直分量强度会表现出差异,从而引起光的偏振特性。

在分析目标红外偏振特性时,应该结合反射辐射和自发辐射两方面进行考虑。反射辐射中垂直分量强于水平分量,而自发辐射却与之相反,因此两者叠加是一种消偏作用,具体哪一种情形起决定性作用,还要结合具体的光照条件以及目标温度等因素来考虑。

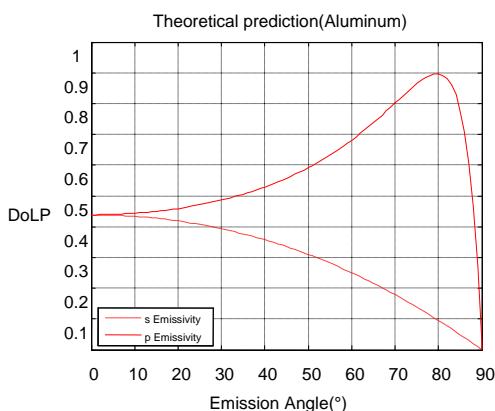
2 红外偏振表示方法和测量方式

2.1 表示方法

斯托克斯矢量表示法是一种常用的表示方法,定义了4个物理量:

$$\begin{aligned} S_0 &= E_x^2 + E_y^2 \\ S_1 &= E_x^2 - E_y^2 \\ S_2 &= 2E_xE_y\cos\Delta\varphi \\ S_3 &= 2E_xE_y\sin\Delta\varphi \end{aligned}$$

斯托克斯参量通常写成列矩阵 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 。其中 S_0 表示光波的总强度; S_1 表示 X 方向与 Y 方向上的线偏振光的强度差; S_2 表示: $+\frac{\pi}{4}$ 方向与 $-\frac{\pi}{4}$ 方向上的线偏振光的强度差; S_3 表示右旋圆与左旋圆



偏振分量的强度差。

偏振度的定义用斯托克斯参数来表示就是

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \text{ 即全偏振分量的强度与该光波总强度的比值。全偏振分量的偏振椭圆方位角}\theta\text{表示为}\theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right);\text{ 偏振椭率角}\varepsilon\text{表示为}\tan(2\varepsilon) = \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}.$$

2.2 测量方式

圆偏振能量比较小,工程上一般忽略($S_3=0$),偏振测量公式如下^[3]:

$$S(\alpha) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\alpha + S_2 \sin 2\alpha)$$

式中: $S(\alpha)$ 是仪器测量值,它表示在 XOY 平面内偏振片透过轴与 X 轴夹角为 α 的方向上进行观测所得到的光强。

通过上面的公式我们可以看到需要3幅不同偏振方向上的强度值,我们就可以求出斯托克斯矢量。实际测量中,我们一般取4个不同偏振方向(0° , 45° , 90° , 135°)下的强度值。

3 探测手段

目前广泛采用的偏振探测方式是分时探测,依次得到所需要的4幅不同偏振角度下的图像,主要有旋转偏振片方式、固定偏振片加旋转波片方式、固定偏振片加固定可变延迟波片方式3种方式。此种方法简单易行,但只能对静止目标进行探测,探测时间较长。

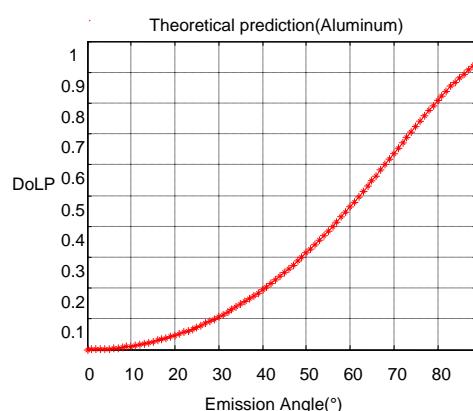


图3 理想光滑铝发射率(左)和自发辐射偏振度(右)仿真结果曲线

Fig.3 The simulation curves of emissivity(left) and spontaneous emission DoLP of ideal smooth aluminum surface(right)

实时探测通过一次曝光获得目标的4幅不同偏振态图像，可以用于快速变化的目标探测。有多种方式可以实现，分振幅（DoAM）、分孔径（DoAP）、分焦平面（DoFP）^[4-5]等。

1) 分振幅方式是通过将一束光分为4个不同的偏振光束，4束偏振光经过4个独立的成像系统，在4个探测器上得到4幅不同偏振方向的偏振图像，缺点是能量利用率低，分光原件较多，体积大，优点是分辨率高；

2) 分孔径方式是使用一个物镜和一个光学成像系统，经过偏振光学元件，将景物辐射的不同偏振态在同一个探测器上成像，优点是不存在过多的分光元件，光学系统稳定，缺点是损失空间分辨率；

3) 分焦平面方式是将微小偏振光学元件集成到FPA上，构成分焦平面同时偏振成像探测器^[6]，主要的探测思想是：以空间换时间，4个像元为一超极像元，4个像元分别对应探测在偏振角0°、45°、90°、135°的强度值，优点，结构紧凑，稳定性高，体积重量小，缺点是分辨率低，存在像素位置匹配误差^[7-8]，集成难度大，图4为分焦平面阵列示意图。

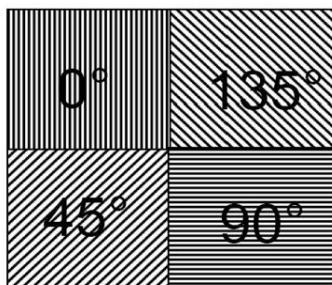


图4 分焦平面阵列示意图

Fig.4 Focal plane array layout

4 实验数据分析以及结论

实验数据的采集是通过一分时的红外偏振探测系统，探测器为256×256 HgCdTe的中波红外面阵探测器，红外偏振片为ZnSe衬底的金属线栅偏振片，消光比>100。红外偏振片安装在一个转台上，由步进电机带动旋转。

4.1 黑体实验

图5是黑体在发射角为45°时的实验结果图。

图6是黑体在不同发射角下偏振度的变化情况。

黑体是接近理想的发射体，从理论上分析，黑体辐射p分量和s分量对应的发射率 $\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi)$ ， $\varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)$ 差异很小，故黑体偏振度很低。图5箭头所指区域是黑体表面，实验测得黑体表面的偏振度

很低，接近于零。图6是黑体的偏振度随着发射角的变化情况，偏振度值一直维持在一个很低的范围内，从而这也验证了实验系统的可靠性。



图5 黑体的灰度图（左）和偏振度图（右）

Fig.5 Gray image(left) and DoLP image(right) of blackbody

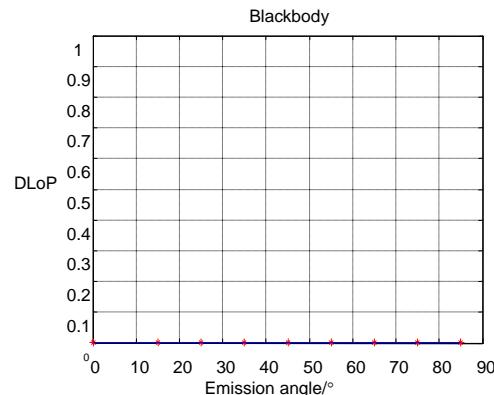


图6 不同发射角黑体的偏振度变化

Fig.6 The Variation of blackbody DoLP with emission angle

4.2 不同粗糙度铝板实验

图7是抛光铝板和喷砂铝板在相同温度下的对比实验，观测角为45°。

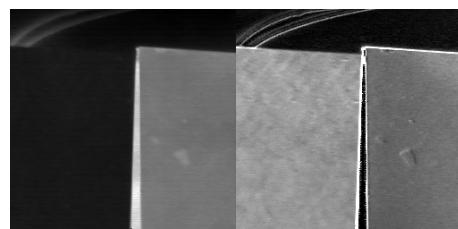


图7 铝板（左光滑右粗糙）灰度（左）和偏振度（右）图

Fig.7 Gray image(left) and DoLP image(right) (The left is smooth, and the right is rough)

在灰度图中，喷砂铝板由于表面漫反射，灰度值比抛光铝板大；在偏振度图中，抛光铝板偏振度是喷砂铝板的1.5左右。

4.3 不同材料金属板实验

图8是光滑铝板和钢板在相同温度下的对比实验，观测角为60°。

铝板和钢板加热到同一温度，灰度图像差别很小，但是偏振度图像差别较大，铝板的偏振度明显大于钢板。

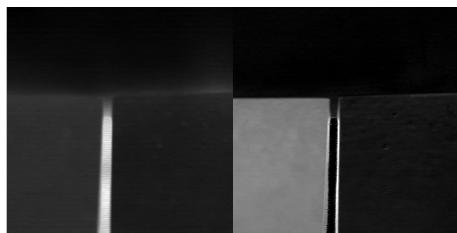


图 8 样板（左光滑铝板、右光滑钢板）灰度（左）和偏振度图（右）

Fig.8 Gray image(left) and DoLP image(right)

(The left is aluminum, and the right is steel)

4.4 不同观测角下铝板实验

通过加热一光滑铝板，获得铝板在不同观测角下的自发辐射偏振信息。

实验结果表明，随着观测角的增加，光滑铝板自发辐射偏振度也一直增加，与理论结果相仿。

4.5 不同场景实验

场景一是一个盛有温度为 60℃ 的玻璃杯，探测距离为 2 m。

场景二是为一远距离建筑物。

4.6 实验结论

黑体是理想的发射体，一方面黑体发射率高，另一方面黑体辐射中垂直分量和平行分量发射率没有差异，因此黑体偏振度是零，图 9 实验结果验证了这一结论。

通过图 7 和图 8 的实验结果，我们可以得知，同一材料不同表面状态，偏振度有差异，表面越光滑偏振度越大；同时偏振度还与材料有关，不同材料的会有不同的偏振度。因此偏振探测能够有效的弥补常规探测的不足。

图 9 是光滑铝板自发辐射偏振度与观测角的关

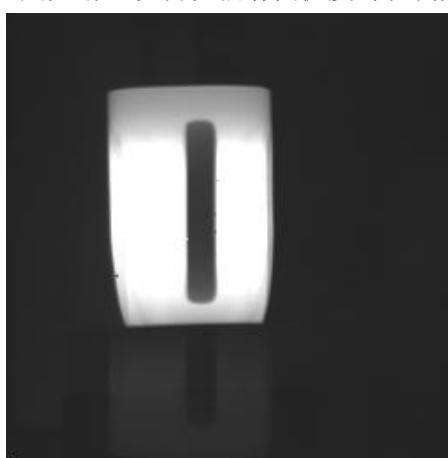


图 10 加热玻璃杯灰度（左）和偏振度（右）图像

Fig.10 Gray image(left) and DoLP image(right) of hot cup

系曲线图，红外自发辐射中，随着观测角的增加，偏振度也会一直增加，红外自发辐射偏振特性是区别于可见光的一个重要方面；图 10 玻璃杯被加热到 60℃，灰度图像中，无法辨别出杯子的细节纹理信息，但是通过偏振度图像，杯子的细节信息得到很好地展现，偏振探测的优势在这里有了展现。图 11 是一实景图像，在偏振度图像中，建筑物上一些金属材质的目标，偏振度较大，特征得到了凸显。

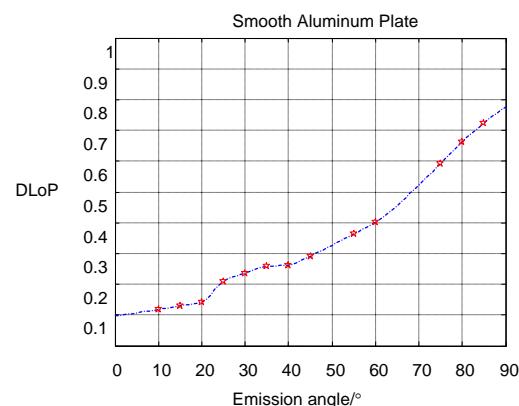


图 9 光滑铝板偏振度与观测角的关系曲线

Fig.9 The relation curves of DoLP with observation angle of smooth aluminum plates

5 总结展望

红外反射辐射以及自发辐射都会引入偏振，在进行红外偏振探测时，我们需要结合这两方面的偏振特性进行分析。目标红外偏振特性与材料，表面状态以及观测有关，表面越光滑偏振度越大，反射辐射中，偏振度随观测角增加，先增大后减少；自发辐射中，偏振度随观测角增加，一直增大。

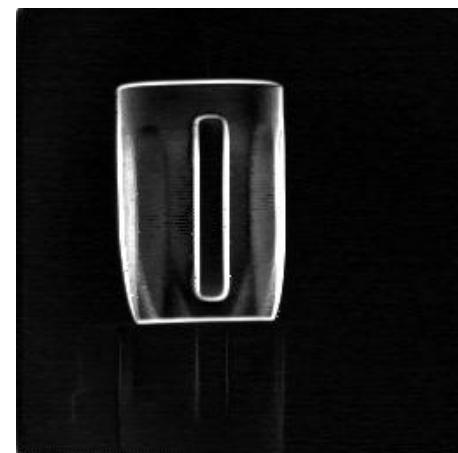


图 10 加热玻璃杯灰度（左）和偏振度（右）图像

Fig.10 Gray image(left) and DoLP image(right) of hot cup



图 11 建筑物灰度图(左)和偏振度(右)

Fig.11 Gray image(left) and DoLP image(right) of building

目前红外偏振探测手段逐步从分时探测向实时探测发展，其中分焦平面技术前景较好，预期在几年内，国内会有微偏振器件的出现。圆偏振分量由于能量较小，在工程应用中一直被忽略，随着新型器件的出现，偏振探测将从线偏振探测到全偏振探测发展；偏振探测作为常规探测的一种补充手段，并不能完全取代常规探测，它本身具有一定的局限性，因此偏振图像与灰度图像的融合会是一个很好的方式，这也将会大大增加图像的细节信息，提高对探测目标的识别能力。

参考文献：

- [1] J Scott Tyo, Dennis L Goldstein, David B Chenault, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2000, **45**(22): 5453-5469.

- [2] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京：科学出版社, 2003: 40-44.
- [3] 曹汉军, 乔延利, 杨伟峰, 等. 偏振遥感图像特征表征及分析[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(4): 373-378.
- [4] 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, **39**(1): 56-62.
- [5] 李双, 裴桢炜, 杨长久. 同时偏振成像探测技术初探[J]. 大气与环境光学学报, 2010, **5**(3): 198-202.
- [6] 赵劲松. 偏振成像技术的进展[J]. 红外技术, 2013, **35**(12): 743-750.
- [7] Shengkui Gao, Viktor GruevImage. Interpolation methods evaluation for division of focal plane polarimeters[J]. SPIE, 2012, **8012**(80120N): 1-10.
- [8] Bradley M. Ratliff, James K. Bogera, Matthew P. Fetrowb. Image processing methods to compensate for IFOV errors in microgrid imaging polarimeters[J]. SPIE, 2006, **6240**(62400E): 1-12.