

长波红外偏振探测性能分析与成像研究

刘宇轩, 顾明剑

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:为了分析研究长波红外偏振探测的原理及探测过程, 本文根据偏振成像的原理, 设计搭建了一套的长波红外偏振探测装置, 在实验室环境下对其进行了性能测试, 测试结果表明整个装置具有较好的性能指标, 并分析了影响探测结果的因素。同时在外场进行了典型目标的长波红外偏振成像, 对人造目标及自然环境分别进行了辐射成像、偏振度成像及偏振角成像, 通过对比分析, 结果表明长波红外偏振成像具有其独特的优势与特点, 对于实际探测应用存在着一定的意义与价值。

关键词:长波红外; 偏振度; 偏振成像

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2013)05-0129-06

长波红外偏振探测是对目标自身辐射的长波波段(6 μm —15 μm)进行其偏振信息的探测。其可以同时获得被测目标的长波红外信息以及偏振探测的优点, 在对地遥感和目标识别中存在着极大的特点和优势。

但是, 由于长波红外与其它波段的红外辐射产生机理不同, 大部分并不是通过太阳光的反射和散射来产生的, 而是来源于物体的自身辐射。一般被测目标为常温目标, 往往能量较低, 这样系统本身的背景辐射会对测量结果产生较大的干扰, 同时长波红外偏振探测装置的定标过程中, 存在着很多影响因素, 定标过程有着一定的困难。因此长波红外偏振探测技术在国内相对于其它波段的发展较为缓慢, 相关的领域研究较少。

本文的研究内容是从最基本的偏振成像原理开始阐述, 并设计搭建了一套长波红外偏振探测装置, 在实验室环境对其进行了性能测试与分析, 测试结果较为理想, 表明其具有较好的性能指标。在外场对一些典型目标和自然环境进行了偏振探测, 探测结果表明, 相比于红外成像, 长波红外偏振成像具有独特的优势与特点。

1 基本原理

1.1 Stokes 公式

完整的描述光波偏振态可以用 Stokes 参数来表示, 其描述如下^[1]:

$$S = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2|E_x||E_y|\cos\delta \\ 2|E_x||E_y|\sin\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_L - I_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, s_0 与入射的光强有关; s_1 和 s_2 与 0° 和 90° 两个方向的线偏振有关; s_3 与左右旋的圆偏振光有关。

偏振度(DOLP)描述为 p , 当 $0 < p < 1$ 时, 入射辐射代表部分偏振光。

$$p = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \quad (2)$$

偏振方位角(AOLP)描述为:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s_2}{s_1}\right) \quad (3)$$

因此关键就是在实验中测量计算出 s_0 、 s_1 和 s_2 。

1.2 测量原理

从定义中可以看出, Stokes 参数具有强度的量纲, 可以使用光电探测仪进行测量。实际探测中, 主要有两种测量方式: 一种是根据 Stokes 参数的定义进行测量; 一种是基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵的偏振测量方式。

1) 根据 Stokes 参数定义测量。按照定义的公式, 只需要分别测量 0° 、 45° 和 90° 三个方向的光强信息, 即可推算出 s_0 、 s_1 和 s_2 。

$$s_0 = I_0 + I_{90} \quad (4)$$

收稿日期 2013-03-18

作者简介: 刘宇轩(1988—), 男, 河南浙川人, 中国科学院上海技术物理研究所, 硕士研究生, 研究方向: 长波红外偏振探测。

$$s_1 = I_0 - I_{90} \quad (5)$$

$$s_2 = 2I_{45} - I_0 - I_{90} \quad (6)$$

最后代入 DOLP 和 AOLP 的表达式算的其偏振信息。

2) 根据 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵测量。在光路中, 光通过某一光学元件后将是何种偏振光决定于光学元件的特性。为了描述光学元件的特性, 可通过米勒矩阵来描述。若输入光矢量为 S_{in} , 则通过 k 个光学器件后的输出矢量为 S_{out} , 则:

$$S_{out} = M_k \cdots M_3 M_2 M_1 S_{in} \quad (7)$$

与参考方向成 θ 角的理想起偏器的米勒矩阵为:

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则出射光的斯托克斯参量 S_{out} 为:

$$S = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = M_p \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过相应的计算后, 出射光强表达式写为:

$$I_\theta = \frac{1}{2} (s_0 + s_1 \cdot \cos 2\theta + s_2 \cdot \sin 2\theta) \quad (10)$$

在实际探测中认为圆偏振光较小且仅有线偏光, 设 $s_3 = 0$, 只需测量 3 个方向的线偏振光强度, 即可通过出射光表达式来反演推算出 s_0 、 s_1 和 s_2 。然后再代入 DOLP 和 AOLP 的表达式算的其偏振信息。

理论上, 任意选取三个偏振方向测量光强都可以完成 Stocks 参数测量, 但是实际实验中, 从工程设计和检偏器透过轴方位角误差带来的测量误差角度考虑, 一般选取 0° 、 60° 和 120° 三个方向的偏振信息。

当选取偏振角度是 0° 、 60° 和 120° 三个方向的时候, 光强计算公式(10)可以变为如下形式:

$$I_{0^\circ} = \frac{1}{2} (s_0 + s_1 + s_2) \quad (11)$$

$$I_{60^\circ} = \frac{1}{2} \left(s_0 - \frac{1}{2} s_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} s_2 \right) \quad (12)$$

$$I_{120^\circ} = \frac{1}{2} \left(s_0 - \frac{1}{2} s_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} s_2 \right) \quad (13)$$

可以推导出偏振度公式为:

$$P = \frac{\sqrt{I_{0^\circ}^2 + I_{60^\circ}^2 + I_{120^\circ}^2 - I_{0^\circ} I_{60^\circ} - I_{60^\circ} I_{120^\circ} - I_{0^\circ} I_{120^\circ}}}{I_{0^\circ} + I_{60^\circ} + I_{120^\circ}} \quad (14)$$

在后续测试中, 就可以根据公式(14)得到探测出

的偏振度。

2 测试原理及装置

为了研究长波红外波段偏振成像技术, 本文利用非制冷的微辐射热计, 搭建了一个进行长波波段偏振成像的实验装置。该实验装置是本文研究中进行理论分析验证的主要手段, 通过其探测结果可以衡量探测装置的性能, 为后续的外场成像实验奠定基础。

由于长波红外产生机理等原因, 其偏振度与很多因素有关, 如被测目标的材料特性、材质粗糙度、材质光学特性, 外界背景的反射干扰等, 这些都会对最终探测到的偏振度产生影响, 因此, 采用反射起偏法来产生偏振源。在实验室环境中, 利用黑体做光源进行反射起偏, 从而产生所需的偏振信息。下面将具体推导反射偏振度表达式。

2.1 测试原理

由菲涅尔公式可知^[2], 物体表面的反射系数为:

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (15)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (16)$$

式中, θ_1 为光线的入射角, θ_2 为折射角, n_1 为介质 1 的折射率, n_2 为介质 2 的折射率。

根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (17)$$

可以将其化为:

$$r_s = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (18)$$

$$r_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (19)$$

所以物体表面的反射率为:

$$R_s = r_s^2 = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (20)$$

$$R_p = r_p^2 = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (21)$$

因此, 通过物体表面反射产生的偏振度公式为:

$$P = \left| \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \right| \quad (22)$$

在测试中, 通过调整入射角 θ_1 , 就可以获得需要的偏振度。

2.2 偏振成像装置

偏振成像装置由偏振片、物镜和探测器三个部分组成, 其装置实物图和示意图分别如下所示:

被测目标发出的长波辐射经过偏振片起偏后通过透镜汇聚在探测器上成像。偏振片可以于垂直纸面方向进行旋转从而改变偏振方向。通过获取一

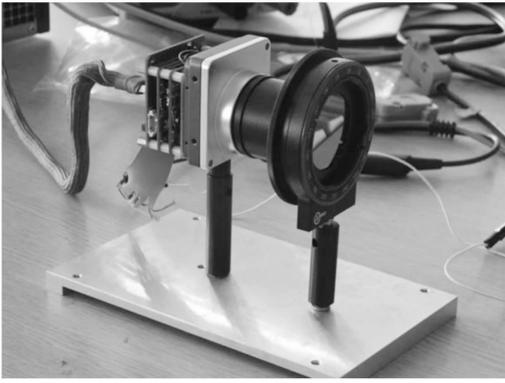


图 1 偏振成像装置实物图

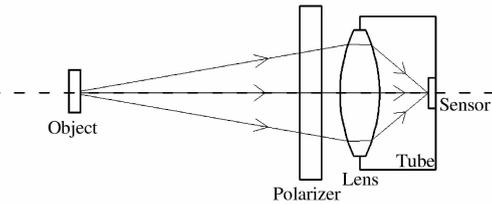


图 2 偏振成像装置组原理示意图

60℃、0℃和+60℃三个偏振方向的辐射测量值,通过反演计算得出目标的偏振度计算结果。其元件的具体参数指标在表 1—表 3 中列出。

表 1 探测器主要技术参数表

探测器类型	非晶硅微量热型焦平面
像素	384×288
像元间距	25μm
波长范围	8~14μm
热灵敏度	<65mk

表 2 红外镜头主要技术参数表

焦距	27mm
视场	20.2°×15.2°
空间分辨率	0.93 mrad
最小成像距离	0.7m
F 数	1

表 3 红外偏振片主要技术参数表

尺寸	Φ50mm
类型	金属栅
材料	ZnSe
消光比	≥300

2.3 实验环境

由于长波红外偏振受到环境影响极为明显,为了提高测试的准确性,性能测试选择在实验室环境。

使用黑体通过准直系统产生无偏长波红外辐射源,形成平行光束入射到材料为 Ge 的平面反射镜上进行反射,平面反射镜置于转台中轴处,可以通过旋转转台来控制光线的入射角度,可以产生已知偏振度的偏振光,验证装置随之放置于相应的反射角度方向进行探测,采集到的光学信息通过上位机控制程序在电脑上进行成像及数据处理。

测试环境的装置实物图和原理示意图如下所示:

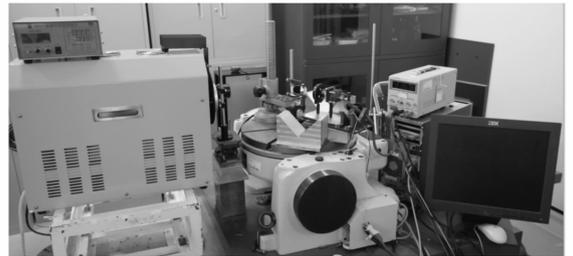


图 3 测试环境实物图

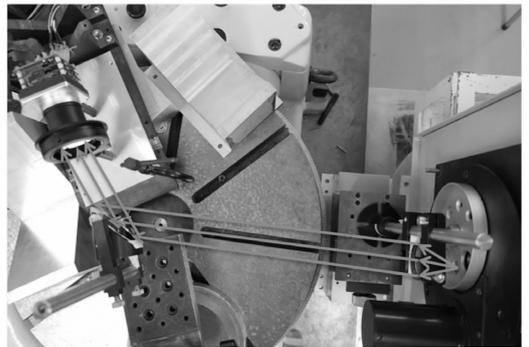


图 4 测试环境光路图

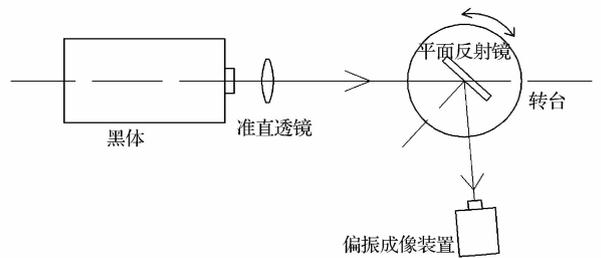


图 5 测试环境示意图

测试环境中的各个元件参数指标在表 4 中列出。

表 4 测试环境的主要部件参数表

黑体	设定温度 60℃
	出射口径 0.5mm
准直透镜	焦距 30mm/口径 30mm
Ge 平面反射镜	折射率 4.00

测试选用的反射镜为 Ge 材料,其折射率为 4.00

左右。将 Ge 的折射率代入上面计算所得的偏振度公式(22),可以获得 Ge 的偏振度—角度关系曲线,如图 6 所示:

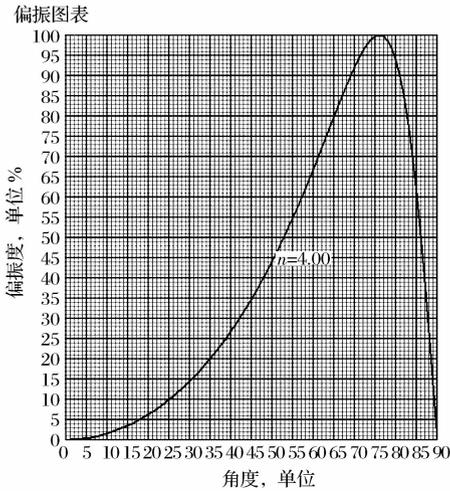


图 6 Ge 反射镜反射偏振度随入射角度的关系曲线

这样,可以将黑体与准直透镜产生的平行光束通过一定的入射角入射到 Ge 平面反射镜上,产生偏振效应,来获得已知的偏振度。

3 偏振探测实验

衡量探测装置性能的主要有三个指标:温度检测精度、偏振精度及偏振准确度。

3.1 温度检测精度测试

温度检测精度探测指标反映的是随着被测目标温度波动,其长波辐射也随之变化,探测装置探测到的输出值能够相应检测到其变化。本文中要求探测器温度精度能达到 0.2K。

设定黑体温度 60℃,使用调整偏振片方向到辐射最强值,考虑到黑体温度存在一定波动,在一定时间(1 分钟)内对目标进行多次采样,采样值选取黑体在成像装置中的均匀成像区域的数值,像素个数为 5×5,并以光斑之外的均匀辐射作为背景辐射进行扣除,以替代辐射定标。

辐亮度公式为^[3]:

$$N = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} d\lambda = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (22)$$

根据辐亮度公式,可以求得黑体在 60°和 60°±0.2°时的辐亮度为 $N_{33K} = 29.6265878 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $N_{33.2K} = 29.6983044 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于探测器会自动进行背景温控,当时的背景温度为 35°,对应的辐亮度为 $N_{\text{ackground}} = 21.3871251 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可求得温度波动

对应的辐亮度变化为:

$$\delta_1 = \frac{(N_{333.2K} - N_{\text{Background}}) - (N_{333K} - N_{\text{Background}})}{N_{333K} - N_{\text{Background}}} \quad (23)$$

求得 $\delta_1 = 8.7040384 \cdot 10^{-3}$ 。

实验时采集测量 30 次,每次用测得的为 5×5 像素数值计算测量平均值,然后求 30 次测量结果的均方根。其中,测量值平均值为 62.3,均方根为 0.4755,其变化值 $\delta_2 = 7.74 \cdot 10^{-3}$,小于 δ_1 。说明温度检测精度测试复合要求。

3.2 偏振精度和偏振准确度测试

偏振探测精度所反映的含义是多次测量同一目标,其测得的偏振值应该保持一致,不会出现偏差。因为长波红外偏振探测的机理较为复杂,因此偏振精度这个指标就比较重要。

偏振准确度所反映的是探测偏振度和实际偏振度之间的偏差。

设定黑体温度 60℃,调整黑体、准直系统、反射镜和成像装置在同一光轴,反射镜分别置于多个角度下分别产生相应的偏振光。

测试分别进行三次 0°、60°、120°三个偏振方向的辐射测量值采集,偏振度的计算方法根据公式(14)得到。

每个偏振度下,进行不少于 20 次的采样。选取数据为黑体成像圆斑中心均匀的 5×5 像元,并以黑体成像圆斑外的均匀辐射作为背景进行扣除。

实验结果如表 5 所示。

表 5 偏振度测量结果

入射角度	测量偏振度	偏振探测精度	实际偏振度	探测准确度
30°	0.116 64	0.56%	0.144 71	19.3%
40°	0.255 78	0.67%	0.268 23	4.6%
50°	0.423 92	0.82%	0.441 22	3.9%
53°	0.473 15	0.64%	0.503 95	6.11%
60°	0.632 82	0.60%	0.669 45	5.47%
70°	0.823 02	0.84%	0.921 67	10.7%

从实验结果可知,偏振探测精度小于 1%,说明探测器探测性能稳定;而偏振探测准确度也保持在一个较好的水平。

3.3 实验结果分析

通过实验结果,验证了长波红外偏振探测原理的正确性及探测装置较好的探测性能。但在实验过程中,也发现了一些长波红外偏振探测与其他波段的偏

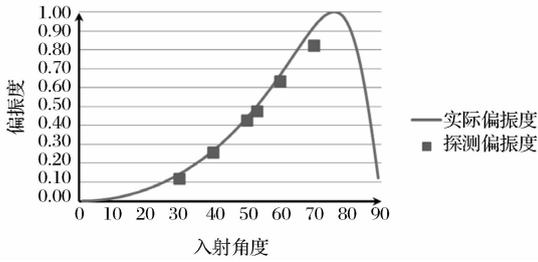


图7 实际偏振度与探测偏振度

振探测的差异性。

1)长波红外是目标自身辐射所产生的,会受自身特性较大影响。虽然偏振度代表的是物体表面特性,与温度没有关联。但是在实际探测时,由于黑体温度的实时波动,会影响到三个偏振方向探测到的辐射值对应并不是同一黑体温度,对于探测结果影响较大

2)在测量时,背景辐射对于探测结果影响也很大,实验室的环境温度不是很稳定,一些其他物体的辐射值会进入到探测器中;而在可见波段,只需要在黑室环境下进行探测就可以扣除背景。

4 外场成像实验

在外场,利用偏振探测装置进行了户外偏振成像实验,选取了一些典型目标进行探测。

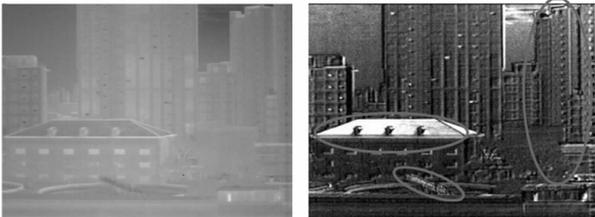


图8 建筑物热红外图像(左)和偏振图像(右)

图8是对建筑物进行辐射探测和偏振探测,可以发现偏振探测比辐射探测可以更好的刻画出被测目标的轮廓以及细节。

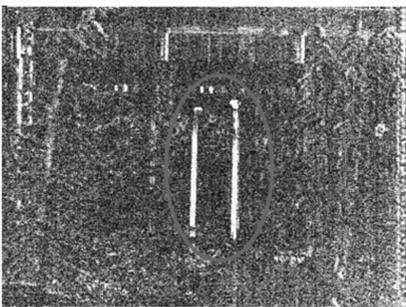


图9 树丛中两根电线杆的偏振图像

图9是在树林中有两个电线杆,通过偏振探测可以很清楚的识别。说明人造目标和自然背景的偏振

差别很大。



图10 汽车热红外图像

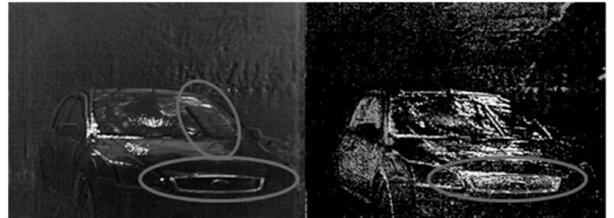


图11 汽车偏振度图像(左)和偏振角图像(右)

图10和图11是对汽车分别进行了辐射探测、偏振度探测和偏振角探测所采集的图像。可以从图上看偏振度图像的汽车更具有立体感,且对比度更好。在偏振角图像中,由于汽车是人造目标,具有比较明显的偏振效应,偏振角信息比较明确,而后面的自然背景的偏振角由于杂乱无章,图像中很难分辨,因此偏振角图像可以更好的区分人造目标和自然背景。

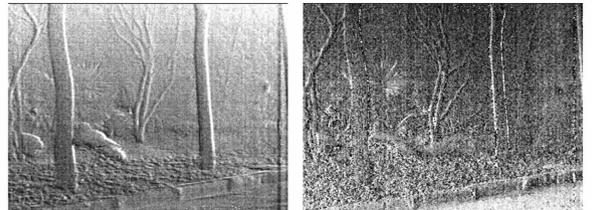


图12 自然景物偏振度图像(左)和偏振角图像(右)

图12是专门对自然景物进行偏振探测,可以很明显的看到偏振角图像上存在较多的噪点,且分辨率不高,这是由于自然目标的偏振特性杂乱造成的。



图13 道路热红外图像

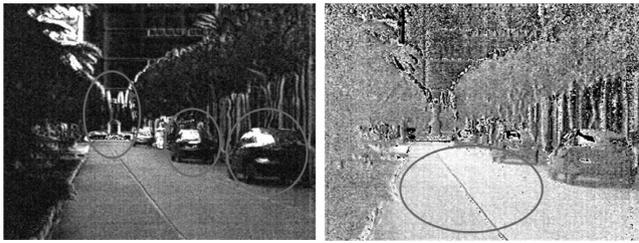


图14 道路偏振度图像(左)和道路偏振角图像(右)

图13和图14是在道路上进行探测,视场中同时存在人造规则目标(马路),人造不规则目标(汽车和雕像)和自然目标(两边的树)。从图上可以清晰看见偏振图像基本上将所有的目标全部描绘出来。而偏振角图像对于人造目标成像比较清晰,对于自然背景依旧成像杂乱无章。

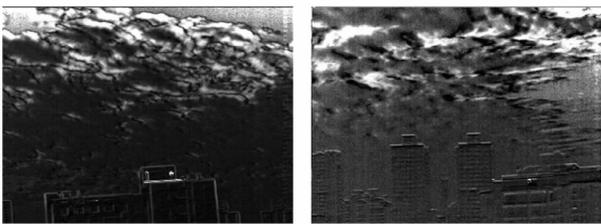


图15 云彩偏振度图像

图15是专门对云彩进行偏振度采集,发现云彩也具有较好的偏振效应,对于大气探测、天气预报等有良好的应有前景。

5 结论

本文首先阐述了长波红外偏振探测的原理模型,并根据其原理设计搭建了一套长波红外偏振探测装置。在实验室环境中,利用反射起偏的原理,对这套探测装置进行了性能检测分析,通过实验结果的计算分析,验证了该探测装置具有较好的性能指标。同时,通过这套探测装置进行了相关典型目标的长波红外偏振成像实验,通过辐射成像、偏振度成像及偏振角成像三种方式的对比研究,得出长波红外偏振成像的特点与优势,对于实际应用中具有一定的意义与价值。

参考文献

- [1] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:15-30.
- [2] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2010:281-284.
- [3] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 上海:中科院上海技术物理研究所教育中心,2008:20-29.

Analysis and Imaging Performance of LWIR Polarization Detection

LIU Yu-xuan, GU Ming-jian

(Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to study the mechanism of LWIR polarization detection, based on the detection of practical, this paper designed established a LWIR polarization detector. In a laboratory environment we carried out the performance testing of the detector. The test results showed that the detector had a good performance. Based on the result, the paper analyzed the factors that influence the detection. At the same time, the article pictured the typical targets in the field, including the artificial target and natural environment. Through comparative analysis of the radiation imaging, the degree of polarization imaging and angle of polarization imaging, the results showed that the infrared polarization imaging had its unique advantages and characteristics, for practical applications there is a certain meaning and value.

Key words: LWIR; the degree of polarization; polarization imaging

(上接第128页)

Discussion on the End-corner Reflection of Ultrasonic and Its Waves Mode Conversion

LING Li-gong

(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environment Protection, Beijing 100088, China)

Abstract: The end-corner reflection of ultrasonic and its characteristics are introduced. In steel-air interface, for example, longitudinal and transverse waves mode conversion and its effect on the time of echo signal transmitting are focused, in the process of the end-corner reflection. On the basis of the above, the causation of the variety of the end-corner reflection ratio and the selection of probe angle in practice are analyzed. Finally, the end-corner reflection identification method in ultrasonic testing of the weld is discussed.

Key words: ultrasonic; end-corner reflection; waves mode conversion; reflection ratio