

文章编号: 1672-8785(2024)06-0035-07

一种集成式红外偏振探测器的 盲元检测方法研究

邢艳蕾 陈 晨 邸添阳
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 现有红外偏振探测器盲元检测主要依据 GB/T 17444-2013 中的判别方法, 这会忽略对某些无法正常响应偏振光的异常像元的统计。这些像元无法通过国标剔除, 严重影响成像质量, 因此需要在原有盲元检测方法的基础上叠加一种偏振盲元检测方法, 从而更精准地对偏振红外探测器进行盲元评价。提出了一种通过依据电动起偏器进行消光比测试来获得偏振盲元的方法, 可以极大地减小由内部偏振角度刻蚀带来的测试误差, 同时可以实现对偏振器件偏振盲元与常规过热像元、死像元的多维度同时检测。利用本单位自行研制的 320×256 探测器进行实验验证。采用国标识别的盲元数量为 1010 个; 引入偏振盲元后, 盲元数量为 1178 个, 总体盲元数量比前者增加了 0.2%。

关键词: 盲元; 偏振探测器; 消光比; 偏振盲元

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.06.004

Research on Blind Element Detection Method for an Integrated Infrared Polarization Detector

XING Yan-lei, CHEN Chen, DI Tian-yang
(North China Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The current blind element detection of infrared polarization detectors mainly relies on the discrimination method in GB/T 17444-2013, which ignores the statistical analysis of abnormal elements that cannot respond properly to polarized light. These elements cannot be eliminated by national standards, which seriously affects the imaging quality. Therefore, it is necessary to add a polarization blind element detection method on top of the original blind element detection method, so as to more accurately evaluate the blind element of polarization infrared detectors. A method for obtaining polarization blind elements through extinction ratio testing based on electric polarizers has been proposed, which can greatly reduce the testing error caused by internal polarization angle etching. At the same time, it can achieve multi-dimensional simultaneous detection of polarization blind elements of polarization devices, conventional overheated elements, and dead elements. Experimental verification is carried out using the 320×256 detector developed by our company. The number of blind elements identified using national standards is 1010. After introducing polarization blind elements, the number

收稿日期: 2023-08-15

作者简介: 邢艳蕾(1992-), 女, 河北衡水人, 硕士, 主要从事红外探测器性能评价分析。

E-mail: t3irdwolf@126.com

of blind elements is 1178; The overall number of blind elements increased by 0.2% compared to using the national standard discrimination method.

Key words: blind element; polarization detector; extinction ratio; polarization blind element

0 引言

传统的红外成像是利用被测目标与其所在场景之间的辐射能量差异来实现目标探测的。当目标周围存在与其等能量的噪声干扰时,目标的提取便会变得困难。在红外探测技术快速进步的同时,光电对抗技术^[1-4]也在不断发展。比如,各种隐身材料的应用使得伪装技术更加多样化,对传统的红外探测技术带来了极大的挑战。再加上探测环境的复杂多变、被测目标与周围环境温差变小等现实因素的影响,红外热成像在实际应用中会存在一定的误判,虚警率较高。

偏振可以提供不同于辐射强度的另一种信息。物体在发生热辐射的同时,会产生属于自身特性的偏振态。这种偏振态在不同状态下表现各异,而且一些物体的偏振信息与其波长存在一定的关系^[6-7]。因此,将偏振特性引入红外成像领域中,可以获得更加丰富的目标信息,并提高图像的对比度,从而极大增强目标探测与识别能力。因此,该方法可用来探测小温差目标,弥补传统红外成像中的不足。

现阶段发展起来的集成式偏振红外探测器一般由红外感光器件、读出电路、偏振结构组成,如图 1 所示。它的核心技术是在普通红外焦平面探测器上刻蚀一层由 0° 、 45° 、 90° 和 135° 共 4 个不同起偏方向的线光栅,不同角度的光栅在器件上的具体排列方式如图 2 所示。可以看出,相邻的 4 个像元构成一组超级像元,整个探测器面阵由这些超级像元构成。

器件制备经过上百道工艺,每一道工艺中的操作不当均可能会在最终的器件上表现为盲元。受多种因素影响,盲元的存在是不可避免的。国标 GB/T 17444-2013^[5]中的盲元定义如下:所有死像元与过热像元的累加和。死像元

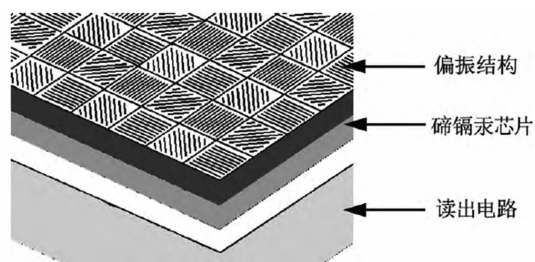


图 1 集成偏振探测器芯片的示意图^[2]

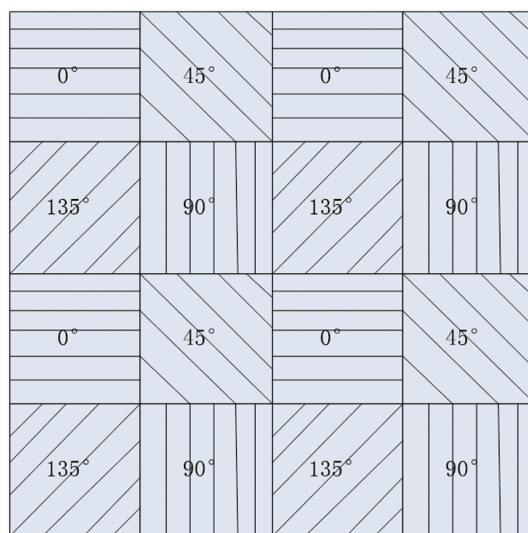


图 2 偏振像元排列的示意图(一个方格代表一个像元)

的定义为响应率小于平均响应 0.5 倍的像元,过热像元的定义为像元噪声电压大于平均噪声电压 2 倍的像元。随着用户应用环境、场景的多样化,盲元的判别方法、判别标准也在发生变化。譬如,某些用户将死元的阈值设置为 $\pm 25\%$,同时相应地增加了电平盲元、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)盲元等。对于集成式红外偏振探测器,除了红外信息还有一部分偏振信息,因此需要识别对偏振光响应为异常的像元。本文结合集成式红外偏振探测器的特点,引入偏振盲元的检测方法,可以实现对偏振盲元与常规过热像元、死像元的多维度同时检测。

1 盲元检测原理

1.1 GB/T17444-2013 国标法

根据盲元的定义, 计算盲元主要涉及平均响应率和平均噪声电压。按照式(1), 所有像元参加计算, 进而可以求得平均响应率:

$$\bar{R} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i, j) \quad (1)$$

根据死像元的定义, 响应率小于平均响应率 0.5 倍的像元为死像元, 记作 d:

$$R(i, j) < \frac{1}{2} \bar{R} \quad (2)$$

过热像元为剔除死元后, 对其余像元进行统计计算, 求取平均噪声电压:

$$\overline{VN} = \frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N VN(i, j) \quad (3)$$

根据过热像元的定义以及式(4), 噪声电压大于平均噪声电压 2 倍的像元被定义为过热像元, 记作 h:

$$VN(i, j) > 2 \overline{VN} \quad (4)$$

按照上述公式, 对同一位置的过热像元和死像元仅统计一次, 进而可以获得整个面阵上所有的盲元。

1.2 偏振盲元法

为评价偏振盲元, 引入消光比^[8-9] C_p :

$$C_p = V_s(i, j)_{max} / V_s(i, j)_{min} \quad (5)$$

式中, i 为集成偏振探测器像元的行坐标; j 为集成偏振探测器像元的列坐标; $V_s(i, j)_{max}$ 为探测器外起偏器方向与探测器内线偏振方向一致时获得的信号(单位为 V); $V_s(i, j)_{min}$ 为探测器外起偏器方向与探测器内线偏振方向垂直时获得的信号(单位为 V)。

常见的起偏器一般静态放置于镜架上。通过手动调节其转动的角度(0° 、 45° 、 90° 、 135°), 分别采集各个偏振角度下的像元在不同黑体温度时的响应信号, 然后进行分析计算。

具体操作步骤如下:

(1) 将外部偏振片调节到 0° 位置, 并调节到其中心与黑体、探测器芯片共轴;

(2) 给探测器施加偏压、时序, 使其正常工作;

(3) 设置黑体温度 T_L (293 K), 采集所有像元在该温度下的响应值 V_{TL0} ;

(4) 设置黑体温度 T_H (308 K), 采集所有像元在该温度下的响应值 V_{TH0} ;

(5) 此时可以获得偏振探测器内部 0° 偏振角度下的信号响应最大值 V_{S0max} 和 90° 偏振角度下的信号响应最小值 V_{S90min} ;

(6) 将外部偏振片调节到 90° 位置, 重复步骤(1)~(5), 可以获得偏振探测器内部 0° 偏振角度下的信号响应最小值 V_{S0min} 和 90° 偏振角度下的信号响应最大值 V_{S90max} ;

(7) 通过式(5)可以获得 0° 和 90° 下各个像元的消光比;

(8) 同理, 可以获得 45° 和 135° 下各个像元的消光比。

测试过程中, 由于偏振片位置的绝对 0 度无法保证, 同时在集成偏振芯片制造过程中, 由金属线光栅刻蚀得到的 4 个偏振态存在一定程度的误差, 无法保证与理论设计值完全一致, 因此本文提出一种采用电动偏振片连续采集整个周期内偏振信息的方法。

图 3 为本文提出的偏振探测器盲元检测的示意图。整个系统由偏振探测器、电动起偏器、面源黑体以及数据采集系统构成。当像元为常规过热像元、死像元、偏振盲元中的任意一种时, 使用本方法后, 该像元都会被判别为无效像元(即盲元)。

具体的检测工作步骤如下:

(1) 将集成式红外偏振探测器、电动起偏

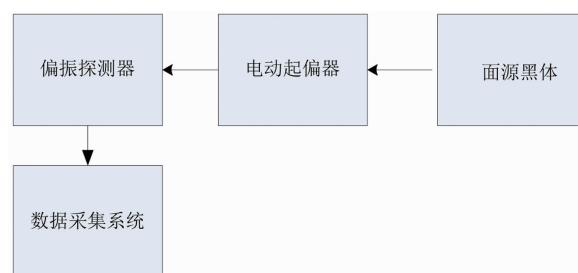


图 3 集成式红外偏振探测器盲元检测的示意图

器和面源黑体置于光学平台上。其中,电动起偏器放在面源黑体与偏振探测器之间。在测试过程中保证探测器的中心、电动起偏器的中心以及面源黑体中心在公共轴线上。

(2)设置电动起偏器的转速 X ($^{\circ}/s$)、总转角,并使其归零位。

(3)设置面源黑体的温度分别为 $T_L = 293$ K、 $T_H = 308$ K。

(4)光电测试系统分别在 T_L 和 T_H 温度下连续采集 m 个周期 ($m \geq 2$) 的偏振信息,进而得到 V_{TL} 、 V_{TH} 两组原始偏振信号。

(5)通过数据重构,分别获得 m 个周期下 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个偏振角度下的 4 组低温数据 V_{TL0} 、 V_{TL45} 、 V_{TL90} 、 V_{TL135} 和 4 组高温数据 V_{TH0} 、 V_{TH45} 、 V_{TH90} 、 V_{TH135} 。

(6)按照本文给出的偏振盲元定义,可以获得偏振盲元的位置与数量。与用国标获得的盲元进行统一,最终得到不同偏振角度下的总盲元。

以 90° 偏振角度为例,进行分析计算;通过 Matlab 数据拟合,获得高低温时各个偏振角度下的偏振曲线。 90° 偏振角度下的偏振曲线为

$$V_{TH90max} = a_{90} * \sin(b_{90} * x + c_{90}) + d_{90} \quad (6)$$

$$V_{TH90min} = a'_{90} * \sin(b'_{90} * x + c'_{90}) + d'_{90} \quad (7)$$

当偏振探测器内部偏振角度 (90°) 与外部偏振片角度 (90°) 的方向一致时,测得的偏振响应信号值最大 (V_{S90max}):

$$V_{S90max} = V_{TH90max} - V_{TL90max} \quad (8)$$

当偏振探测器内部偏振角度 (90°) 与外部偏振片角度 (90°) 的方向一致时,测得的偏振响应信号值最小 (V_{S90min}):

$$V_{S90min} = V_{TH90min} - V_{TL90min} \quad (9)$$

按照式(5)可以获得 90° 下各个像元的消光比。计算各偏振角度下的消光比均值 \overline{CP} , 设置阈值 k 。当单个像元的 $CP(i, j) < k \overline{CP}$ 时,该像元被标记为偏振盲元。

将偏振盲元与 GB/T17444-2013 方法获得

的盲元进行叠加统计,可以得到 90° 偏振方向下偏振红外探测器的总盲元。同理,可以获得 0° 、 45° 、 135° 三个偏振方向下的偏振盲元。综合国标法测得的死元和过热像元,可以测得整个红外偏振探测器下的盲元总位置表,进而求出整个器件的总盲元。

2 实验及分析

为了有效评估该偏振器件的盲元特性,以本单位自行研制的集成式偏振 320×256 探测器为例进行方法验证。分别采用 GB/T 17444-2013 方法和本文方法进行盲元统计与分析。器件的电平灰度如图 4 所示。

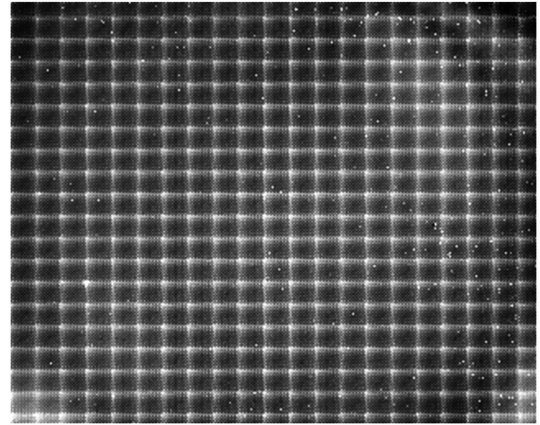


图 4 320×256 探测器的电平灰度图

基于 GB/T 17444-2013 方法,按照第 1 部分的公式,分别计算 4 个偏振角度下的过热盲元与死像元。盲元分布如图 5 所示。可以看出,4 个不同偏振角度下都存在一定程度的无效像元,此处的死像元判据为 0.5,过热像元判据为 2。这些像元严重影响了成像质量,会在成像图上表现为亮点或暗点。因此需要根据其位置分布进行提前识别、替代。

引入偏振盲元后,假定消光比小于等于 6 时,该像元为偏振盲元。此时的盲元分布如图 6 所示。可以看出,前面的国标法判据已经剔除了大部分盲元,但仍有部分像元通过国标法无法识别。将两种方法进行叠加处理,可以进一步地判别无效像元。最终的盲元分布如图 7 所示。

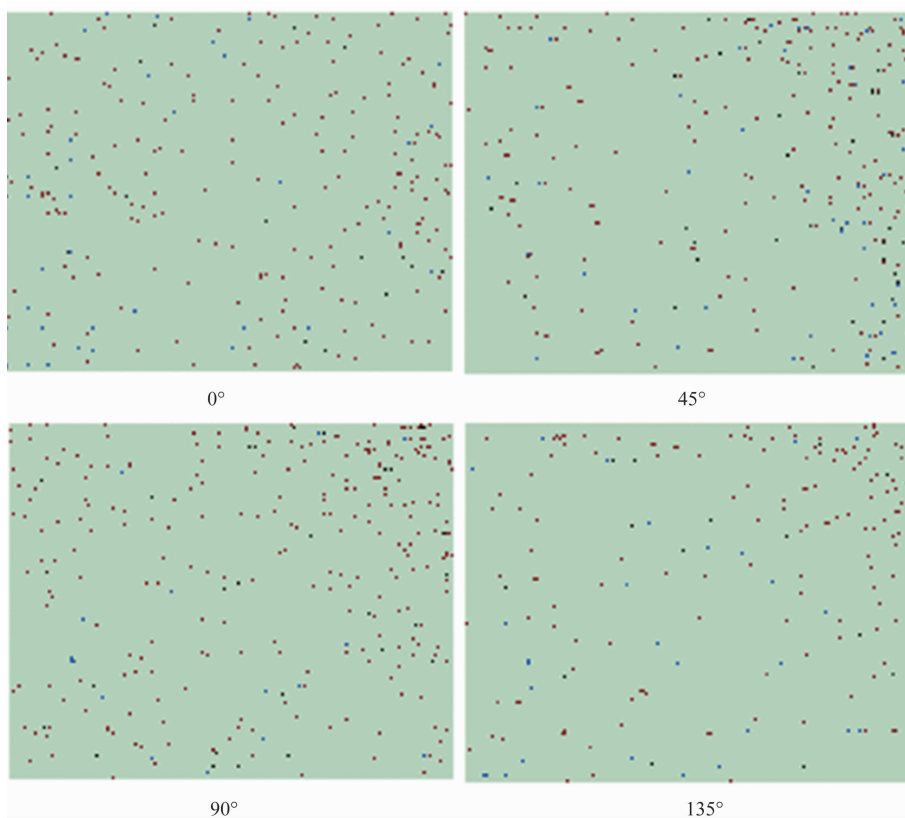


图 5 用国标法获得的盲元图

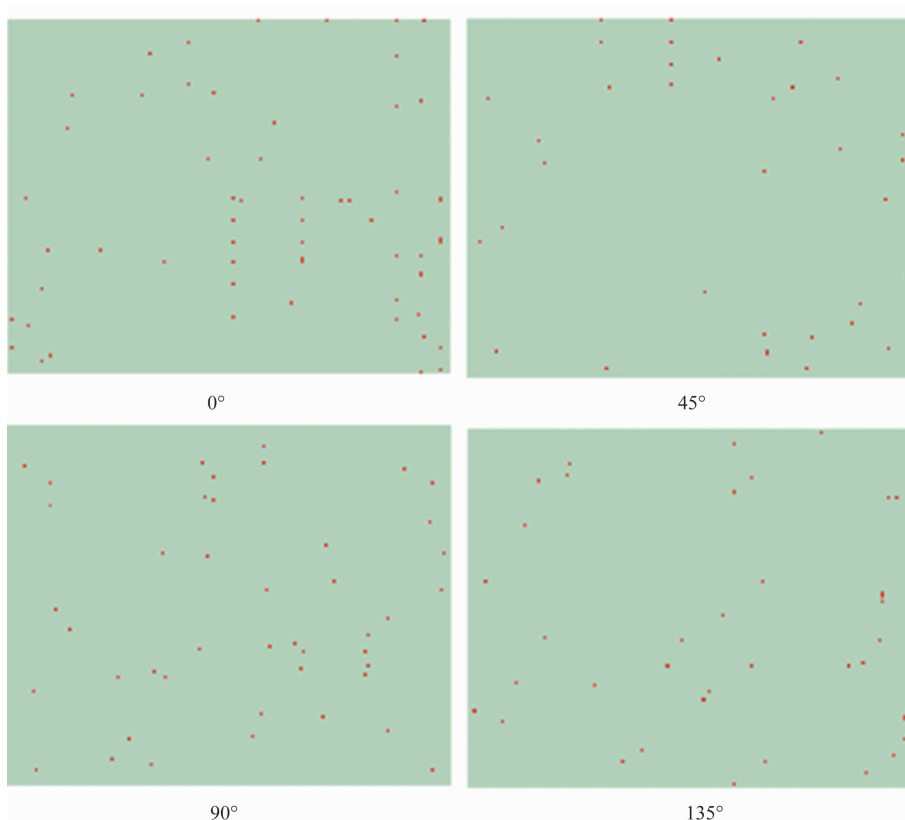


图 6 偏振盲元分布图

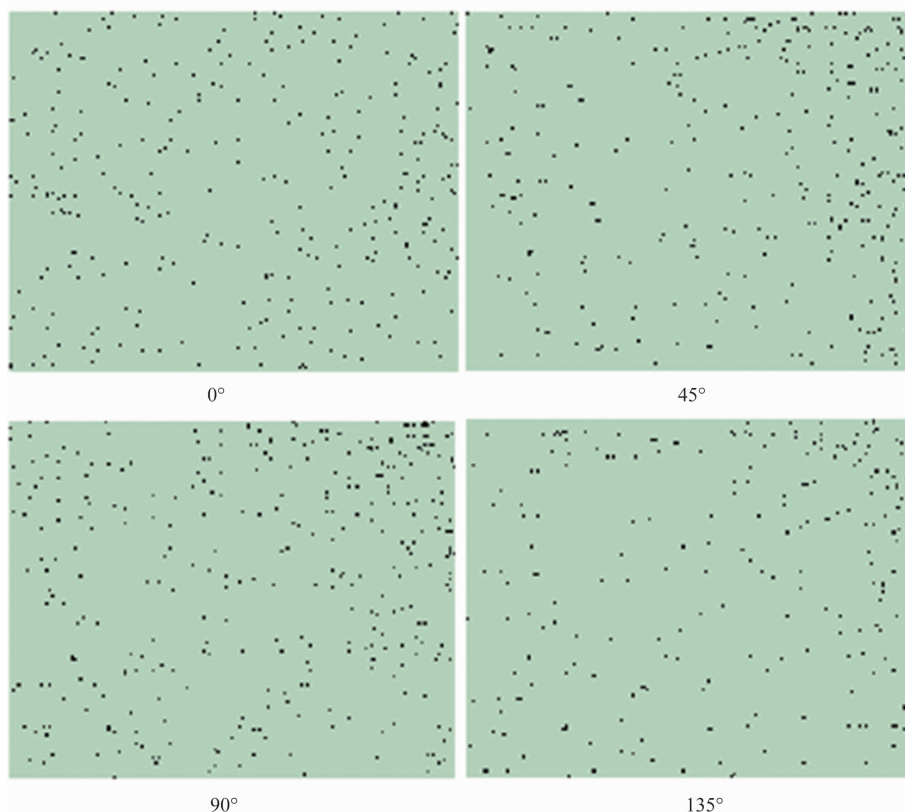


图 7 总体盲元分布图

表 1 不同偏振角度下的盲元分布情况

| | | 0° | 45° | 90° | 135° |
|----------|--------|-------|-----|-----|------|
| 方法 1 | 过热盲元 | 216 | 237 | 275 | 159 |
| | 死元 | 53 | 80 | 44 | 42 |
| | 总盲元 1 | 1010 | | | |
| | 总盲元率 1 | 1.23% | | | |
| 方法 2 | 偏振盲元 | 59 | 39 | 44 | 38 |
| | 总盲元 2 | 180 | | | |
| | 总盲元率 2 | 0.22% | | | |
| 综合后总体盲元 | | 295 | 325 | 334 | 224 |
| 综合后总体盲元率 | | 1.44% | | | |

由表 1 中的数据可知，引入偏振盲元后，每个偏振方向都有将近 0.2% 的像元未被判别成坏元。这些像元在实际应用情况下无法正常响应外界偏振光，会影响成像质量，应被判为无效元。但是只采用传统的盲元判别方法则无法识别该部分像元。

3 结束语

现有集成式红外偏振探测器盲元检测主要

依据 GB/T 17444-2013 中的判别方法获取死像元与过热像元分布信息，然后进行盲元替代。但是实际使用过程中，探测器的某些像元对偏振光无法正常响应，这些像元无法通过国标剔除，严重影响成像质量。本文在原有盲元检测方法的基础上叠加一种偏振盲元检测方法，并通过本单位自行研制的 320×256 探测器进行实验验证，得到盲元 1178 个。而引入偏振盲元前，采用国标识别法得到的盲元数量为

1010 个, 总体盲元数量比国标判别法增加了 0.2%。当然, 实际应用过程中的盲元判别标准或者阈值可能会随应用环境的变化而变化。本文从理论计算的角度出发, 为偏振探测器应用过程中的盲元判别提出了一种新思路, 可以提前将部分无效像元筛选补偿。现阶段的研究内容是在理论分析层面进行了阐述, 下一步将结合实际成像效果对盲元判别方法开展进一步研究。

参考文献

- [1] 虞水中. 非制冷红外成像系统算法评估技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [2] 林国画, 张敏, 孟令伟, 等. 集成式偏振红外焦平面探测器的制备 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(10): 1234-1238.
- [3] 易琰, 严志强, 唐湘燕, 等. 红外偏振成像的目标探测技术研究 [J]. *计量技术*, 2013, **56**(6): 27-30.
- [4] 于洵, 朱磊, 姜旭, 等. 基于微透镜阵列偏振探测器的噪声性能研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(S1): 189-195.
- [5] 中国科学院上海技术物理研究所. GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法 [S]. 北京: 工业和信息化部电子工业标准化研究所, 2013.
- [6] 孙夺. 集成偏振近红外 InGaAs 焦平面探测器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2020.
- [7] 万灿. 基于 FPGA 的红外偏振图像处理算法研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2023.
- [8] 邢艳蕾, 于元祯, 张小倩, 等. 一种红外偏振探测器的盲元检测方法: CN202211162363.6 [P]. 2023-01-20.
- [9] 赵永强, 汪德棠. 一种适用于红外偏振焦平面的盲元检测方法: CN202110111168. X [P]. 2021-06-04.