

分焦平面偏振集成中波红外探测器数据校正与成像研究

王 琰^{1,2}, 周 建^{2,3*}, 曹耀匀^{1,2}, 王芳芳^{2,3}, 应翔霄³, 汤受海³, 汪玲芳¹,
刘云猛^{2,4}, 周 易^{1,2,3*}, 陈建新^{1,2,3}

(1. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

4. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 由于焦平面自身的非均匀性、微偏振片阵列的工艺缺陷以及集成匹配误差等因素影响, 导致偏振集成探测器存在更为严重的盲元和非均匀性问题。国标盲元检测和传统非均匀性校正方法的局限性导致偏振盲元漏检和非均匀性校正失真等问题。为了解决上述问题, 建立了偏振探测器的线性响应模型, 在响应校正的基础上, 定标了微偏振片参数, 实现了入射辐射的偏振校正。提出了一种基于非线性最小二乘拟合马吕斯曲线的盲元检测方法, 标定了各个通道的标准曲线, 利用曲线偏差和拟合参数, 实现了响应盲元和偏振盲元的同时检测。利用自研的中波红外偏振集成探测器实验验证, 校正结果显示, 偏振校正后非均匀性相比原始数据和响应校正分别降低了 98.14% 和 40.46%; 检测出响应盲元有 563 个, 偏振盲元有 86 个。成像结果表明, 文中方法盲元识别准确, 而国标法存在盲元漏检问题, 校正后的偏振信息能够凸显成像场景的目标轮廓。有效解决了探测器原始数据存在的问题, 为偏振集成探测器的数据处理和偏振成像质量提升提供了参考。

关键词: 偏振集成探测器; 非均匀性校正; 响应曲线拟合; 盲元检测; 偏振成像

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250149

引用格式: WANG Long, ZHOU Jian, CAO Yaoyun, et al. Data calibration and imaging for division-of-focal-plane polarization-integrated mid-wave infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(8): 20250149.

王琰, 周建, 曹耀匀, 等. 分焦平面偏振集成中波红外探测器数据校正与成像研究[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(8): 20250149.

0 引 言

偏振是电磁波的重要物理特性之一^[1], 用于描述电磁波传播过程中电场矢量的振动特性。随着红外偏振成像技术的发展, 偏振探测^[2]不仅能够探测目标的辐射强度信息, 还能同时获取目标的偏振信息, 解决在目标与背景的辐射强度特征相似的情况下传统

红外成像技术无法辨别目标的问题^[3]。偏振集成红外成像系统在军事侦察^[4-5]、航空航天^[6]和气象遥感^[7]等领域受到广泛的应用^[8]。

集成式偏振成像系统的核心是偏振集成探测器, 探测器的像元阵列与偏振片阵列的微结构^[9]一一对应。相邻的 2×2 像元组成一个超像元结构, 其检偏方

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237); 国家重点研发计划项目 (2022YFB3404405); 中国科学院先导项目 (XDB0980000); 中国科学院青年创新促进会项目 (Y202057); 上海市扬帆计划项目 (22YF1455800, 21YF1455000); 上海市自然科学基金项目 (23ZR1473500, 23ZR1473100); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项 (CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); 中国博士后科学基金项目 (2024M750687); 红外探测技术国家重点实验室基金项目 (IRDT-23-01)

作者简介: 王琰, 男, 硕士生, 主要从事红外偏振成像方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 周建, 男, 副研究员, 博士, 主要从事偏振集成红外探测器及数据处理方面的研究。

周易, 男, 研究员, 博士, 主要从事多维度集成红外探测器及数据处理方面的研究。

向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° ，如图 1 所示。受焦平面制造工艺、半导体特性以及读出电路等多种因素的综合影响，盲元的产生和非均匀性现象^[10-11]成为焦平面不可避免的问题。若不针对盲元和非均匀性进行校正，图像可能出现亮暗斑或横竖条纹等现象，严重降低系统成像质量。

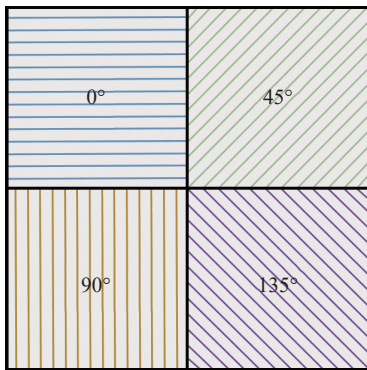


图 1 偏振超像素结构示意图

Fig.1 Polarization super-pixel structure

在国标 GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法^[12]中，盲元被定义为无效像元，包括死像元和过热像元。在偏振集成探测器中，若某些像元无法正常响应或检测偏振信息，则将其定义为偏振盲元。随着红外成像技术的不断发展，盲元的定义和分类日益细化，判断标准和判别方法也在不断优化。

由于微偏振片阵列的工艺缺陷、偏振片阵列和焦平面阵列之间的匹配误差，使得同强度同一偏振方向入射光受到的偏振调制不同，进而导致集成式偏振成像系统盲元数量增多和非均匀性加剧问题。受到盲元和非均匀性的影响，红外图像会产生噪点、信息丢失和误差增大等现象^[13]。因此，偏振集成探测系统的数据预处理显得尤为重要。传统国标法主要基于响应数值实现盲元判别，无法评判像元的偏振信息获取能力，因此在偏振盲元的检测方面存在局限性。目前非均匀性校正的方法主要分为基于辐射定标的校正和基于场景的校正，前者是通过均匀的黑体辐射完成探测器响应的校正，后者是利用场景的统计特性，辐射定标法相比场景法往往具有更高的校正精度和更稳定的校正性能。

在探测器数据校正领域，已有诸多研究进行了深入探索。周慧鑫^[14]等利用焦平面对双参考辐射源的

响应数据实现了盲元检测。刘会通^[15]等在理论上完整地推导了两点校正法并分析了校正中存在的误差。刘海峰^[16]等通过对微偏振片阵列定标实现了偏振的非均匀性校正。邢艳蕾^[17]等借助高低温双参考辐射源和高消光比偏振片计算像元消光比实现偏振盲元的检测。但是实际偏振集成成像系统具有严重的非均匀性，并且微偏振片的检偏方向与理想存在差异，对盲元判别的准确性造成干扰，进而影响强度和偏振信息的提取。

针对偏振集成探测器的数据预处理工作，文中采用基于辐射定标的校正方法，首先通过响应校正和偏振校正完成了偏振集成探测器的非均匀性校正。在此基础上，提出了一种基于非线性最小二乘拟合^[18]马吕斯曲线的盲元检测方法，分析出各偏振通道像元实际响应曲线与标准曲线的偏差，并结合曲线拟合参数实现了死像元、过热像元和偏振盲元的同时检测。

1 偏振集成探测器数据处理方法

1.1 探测器偏振响应模型

在理想情况下，分焦平面偏振集成探测器响应模型如图 2 所示。入射辐射斯托克斯矢量 S_{in} 经过偏振器件 M_p 的偏振调制后，得到出射斯托克斯矢量 S_{out} ，其矩阵关系为：

$$S_{out} = M_p S_{in} \quad (1)$$

偏振集成红外焦平面阵列不同偏振方向的像元响应并不对入射辐射的偏振态敏感，而是与入射光强呈线性关系^[10]，因此响应的线性模型如下：

$$I = GL_{out} + k = GS_{out}^1 + k \quad (2)$$

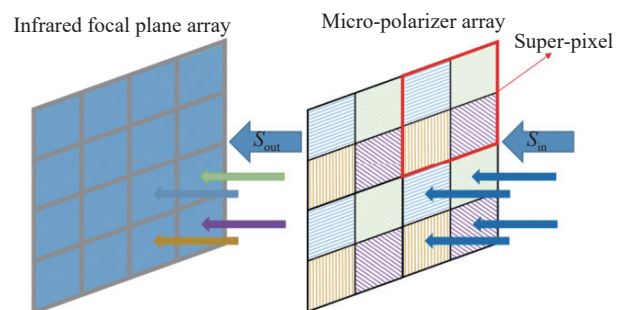


图 2 分焦平面偏振集成探测器响应模型

Fig.2 Response model of division-of-focal-plane polarization integrated detector

式中: I 表示探测器上的像元响应数值; L_{out} 表示出射辐射 S_{out} 的辐射强度; S_{out}^1 表示斯托克斯矢量 S_{out} 的第一个光强参数; G 表示像元的增益系数; k 表示像元的偏置系数。

1.2 响应非均匀性校正

响应非均匀性是指在同一强度的红外辐射下, 红外焦平面阵列中各个像元的输出不一致的现象。根据公式 (2) 可知, 响应非均匀性校正的核心在于确定像元的增益系数 G 和偏置系数 k , 通常采用两点校正法, 计算方法如下:

$$\begin{cases} I_H = G \cdot L_H + k \\ I_L = G \cdot L_L + k \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_H 和 L_L 分别表示高温黑体和低温黑体所对应的辐射强度; 探测器端所对应的响应数值分别为 I_H 和 I_L 。

联立公式 (3) 可求得增益系数和偏置系数, 计算结果如下:

$$\begin{cases} G = \frac{I_H - I_L}{L_H - L_L} \\ k = \frac{I_H L_L - I_L L_H}{L_L - L_H} \end{cases} \quad (4)$$

将公式 (4) 中获得的增益系数 G 和偏置系数 k 代入公式 (2), 响应非均匀性校正后的辐射强度可以表示为:

$$L_{\text{out_cor}} = \frac{I_{\text{real}} - k}{G} \quad (5)$$

入射光经过微偏振片阵列后, 以超像元为单元, 探测器端的响应校正值记为 $\mathbf{L}_{\text{sp}} = [L_0 \ L_{45} \ L_{90} \ L_{135}]^T$, 入射辐射经过微偏振片阵列调制后的光强为:

$$\mathbf{L}_{\text{sp}} = \mathbf{M}_{\text{sp}}^1 \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{M}_{\text{sp}}^1$ 为超像元中所有像元穆勒矩阵第一行元素构成的矩阵。

根据仪器矩阵的非线性最小二乘拟合定标法原理^[19-20], 微偏振片穆勒矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_{\text{sp}}^1 = \mathbf{L}_{\text{sp}} \mathbf{S}_{\text{in}}^{\dagger} = \mathbf{L}_{\text{sp}} \mathbf{S}_{\text{in}}^T (\mathbf{S}_{\text{in}} \mathbf{S}_{\text{in}}^T)^{-1} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{S}_{\text{in}}^{\dagger}$ 为入射辐射矩阵的穆尔-彭罗斯广义逆矩

式中: $L_{\text{out_cor}}$ 表示响应校正后的辐射强度; I_{real} 表示探测器端像元的真实响应值。

1.3 偏振非均匀性校正

面源黑体输出的无偏光的斯托克斯矢量可以表示为:

$$\mathbf{S}_{\text{black}} = [S_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (6)$$

式中: S_0 表示面源黑体的辐射强度。

偏振校正需要引入偏振态已知的线偏振光, 通过外置偏振片实现 (消光比大于 1000 : 1), 该器件可视为理想偏振器件。假设偏振片检偏方向为 θ_1 , 令 $x_1 = \cos 2\theta_1$, $y_1 = \sin 2\theta_1$, 对应的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_{\text{lp0}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 \\ x_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & 0 \\ x_1 & x_1 y_1 & y_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

经过外部偏振片调制后, 微偏振片阵列前的入射辐射为:

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \mathbf{M}_{\text{lp0}} \mathbf{S}_{\text{black}} = \frac{1}{2} [S_0 \ x_1 \cdot S_0 \ y_1 \cdot S_0 \ 0]^T \quad (8)$$

由于偏振集成探测器的微偏振片阵列的消光比较低, 无法视为理想偏振片处理, 假设偏振片的透光轴透过率为 u , 阻光轴透过率为 v , 检偏方向为 θ_2 , 令 $x_2 = \cos 2\theta_2$, $y_2 = \sin 2\theta_2$, 那么单个微偏振结构所对应的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_{\text{lp}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u+v & (u-v)x_2 & (u-v)y_2 & 0 \\ (u-v)x_2 & (u+v)x_2^2 + 2\sqrt{uv}y_2^2 & (u+v-2\sqrt{uv})x_2y_2 & 0 \\ (u-v)y_2 & (u+v-2\sqrt{uv})x_2y_2 & (u+v)y_2^2 + 2\sqrt{uv}x_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

阵。公式 (11) 可以通过最小二乘法对每一个超像元拟合, 定标后微偏振片阵列每一个像元都对应着一个特定的穆勒矩阵。

微偏振片穆勒矩阵解算完成后, 经过矩阵运算能够还原入射斯托克斯矢量。入射到偏振片上的斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = [\mathbf{M}_{\text{sp}}^1]^{\dagger} \mathbf{L}_{\text{out_cor}} \quad (12)$$

在理想偏振集成成像系统中, 各个接收到的理想辐照度为:

$$\mathbf{L}_{\text{ideal}} = \mathbf{M}_{\text{ideal}} \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (13)$$

式中: L_{ideal} 表示像元接收的理想强度, 即为偏振校正后的辐射强度; M_{ideal} 为理想的偏振片穆勒参数矩阵, 理想偏振片在各个检偏方向上对入射辐射进行偏振调制。

为了定量评价非均匀性的校正效果, 借鉴传统图像非均匀性的概念, 对偏振强度图像进行非均匀性度量。由于超像元中每个通道对应的角度不同, 因此偏振非均匀性的评价方式与传统非均匀性评价有所不同, 需要对四个通道单独计算。定义检偏通道为 α 的像元总盲元数量为 d_α , 则偏振非均匀度 NU_α 可表示为:

$$NU_\alpha = \frac{1}{\bar{I}_\alpha} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_\alpha \cdot N_\alpha - d_\alpha} \cdot \sum_{i=1}^{M_\alpha} \sum_{j=1}^{N_\alpha} [I_\alpha(i, j) - \bar{I}_\alpha]^2} \quad (14)$$

式中: $\bar{I}_\alpha$ 为 α 通道上所有像元响应的平均值; $I_\alpha(i, j)$ 为 α 通道上像元 (i, j) 的响应值; 通道 α 的分辨率为 $M_\alpha \times N_\alpha$ 。

对于整幅图像的非均匀度计算, 通过算术平均法将四个通道的均匀度整合, 即整幅图像的非均匀度可表示为:

$$NU_{\text{all}} = \frac{NU_{0^\circ} + NU_{45^\circ} + NU_{90^\circ} + NU_{135^\circ}}{4} \quad (15)$$

1.4 非线性最小二乘马吕斯曲线拟合

在理想条件下, 假设外部黑体辐射源工作温度恒定, 通过引入高消光比线偏振片可以实现入射辐射的调制, 像元的检偏方向为 α , 根据马吕斯定律, 像元响应曲线可简化为一条马吕斯曲线:

$$I_{\theta, \alpha} = G_\alpha \sin^2(2\theta - \alpha) + k_\alpha \quad (16)$$

式中: G_α 表示加入线偏振片后, 像元检偏方向为 α 的增益系数; k_α 为相应的偏置系数; θ 表示偏振片的检偏方向。在一个超像元中, 四个检偏方向的像元理想归一化响应曲线如图 3 所示。

在曲线拟合中, 拟合的目标函数为马吕斯曲线, 则采用的方法是非线性拟合, 假设目标拟合函数的形式为:

$$f_\theta = a \sin^2(2\theta + b) + c \quad (17)$$

式中: a, b, c 为需要拟合的曲线参数; f_θ 表示外部偏振片检偏角度为 θ 时的拟合响应值。

那么拟合的响应数据 f_θ 和原始响应数据 I_θ 的偏

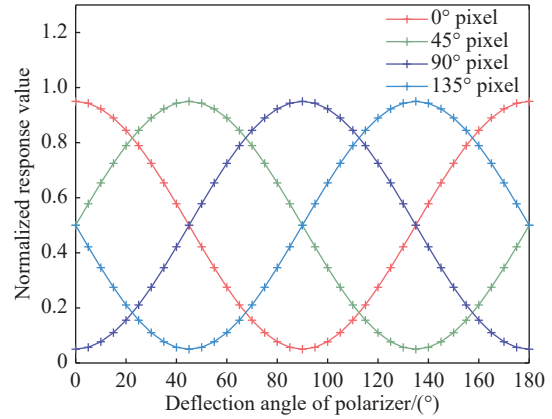


图 3 四个偏振方向像元理想归一化响应曲线

Fig.3 Ideal normalized response curves of pixels in four polarization directions

差可以表示为:

$$\delta_\theta = f_\theta - I_\theta \quad (18)$$

为了使得拟合数据与实际数据偏差的平方和最小, 文中使用最小二乘法拟合, 目标函数的表达形式为:

$$\min \|\delta\|_2^2 = \min \sum_{\theta=0^\circ}^{180^\circ} (f_\theta - I_\theta)^2 \quad (19)$$

非线性最小二乘拟合后, 得到的参数 a, b, c 是计算出来的最优解, 分别是响应曲线最优的振幅、相位偏移和偏置参数。

1.5 响应盲元检测

根据非均匀性校正结果, 在各个通道上分别取拟合参数的均值, 作为该通道的标准响应曲线, 标准曲线表达式为:

$$y_{\alpha, \theta} = (\bar{a}_\alpha) \sin^2(2\theta + \bar{b}_\alpha) + (\bar{c}_\alpha) \quad (20)$$

式中: $y_{\alpha, \theta}$ 表示像元 α 通道检偏角为 θ 的拟合响应值; $\bar{a}_\alpha, \bar{b}_\alpha, \bar{c}_\alpha$ 分别表示拟合参数 a, b, c 在像元 α 通道的均值。

标准响应曲线和实际响应曲线的偏差可通过方差来量化, 表示为:

$$MSE_\alpha(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{\theta=0^\circ}^{180^\circ} (y_{\theta, \alpha} - I_{\theta, \alpha}(i, j))^2 \quad (21)$$

式中: $MSE_\alpha(i, j)$ 表示 α 通道上像元 (i, j) 的响应方差。

将方差作为衡量数据偏离程度的指标, 偏离大的位置判定为盲元, 判定方式如下:

$$MSE_{\alpha}(i, j) > t \cdot \text{mean}(MSE_{\alpha}) \quad (22)$$

式中: t 为数据偏离程度的阈值系数; $\text{mean}(MSE_{\alpha})$ 表示 α 检偏通道上的所有像元响应方差的均值。

1.6 偏振盲元检测

由于制造工艺和集成技术等因素的影响, 红外探测器中微偏振片阵列的检偏方向与实际方向存在差异, 其次像元方向与偏振片方向也存在一定的偏差, 所以导致像元响应曲线存在一定程度的相移。在消光比计算时, 如果采用的不是响应的最值, 计算的像元消光比会存在一定的误差, 最终导致偏振盲元的误判。因此, 文中采用拟合参数进行像元消光比的计算, 计算方式如下:

$$ER = \frac{(c_H + \text{abs}(a_H)) - (c_L + \text{abs}(a_L))}{(c_H - \text{abs}(a_H)) - (c_L - \text{abs}(a_L))} \quad (23)$$

式中: a_H 和 c_H 为黑体辐射高温时的拟合参数; a_L 和 c_L 为辐射低温时的拟合参数; $\text{abs}()$ 表示对数据取绝对值。

消光比的数值越大表示像元的偏振信息获取能力越强, 因此偏振盲元的判定方式如下:

$$ER(i, j) < \gamma \cdot \text{mean}(ER) \quad (24)$$

式中: $ER(i, j)$ 为像元 (i, j) 的消光比; $\text{mean}(ER)$ 表示整个焦平面消光比的均值; γ 为偏振盲元的阈值系数。

2 实验及数据分析

2.1 实验过程

偏振集成红外探测器测试系统装置如图 4 所示, 包括笔者课题组研制的中波红外分焦平面偏振集成探测器、红外焦平面数据采集系统、面源黑体、高消光比偏振片、偏振片旋转步进电机以及红外光学镜头等。其中中波红外分焦平面偏振集成探测器像元阵列规模为 320×256 , 像元中心距 $30 \mu\text{m}$ 、光谱响应范围 $3 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 峰值探测率 $2.4 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 偏振片步进电机绝对精度为 $\pm 0.14^\circ$, 偏振片在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 区间消光比大于 $1000:1$ 。偏振响应数据采集流程如下:

1) 将面源黑体的工作温度调节到红外探测器正常响应的范围内, 实验使用的是中波红外探测器, 所以调节黑体温度至 35°C , 保持恒定, 采集红外探测器的响应数据;

2) 在偏振集成探测器和黑体之间加上带高消光

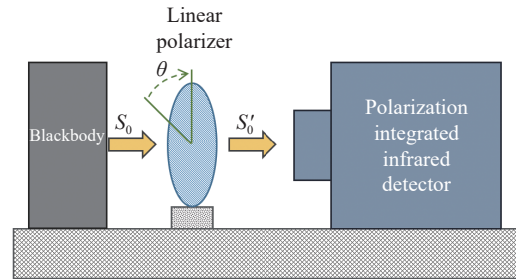


图 4 偏振集成红外探测器测试系统

Fig.4 Polarization integrated infrared detector test system

比偏振片的步进电机, 通过步进电机将偏振片调节至检偏角为 0° 的初始位置, 并且调节探测器、偏振片和面源黑体共轴;

3) 偏振片检偏角度区间设置在 $0^\circ \sim 180^\circ$, 控制步进电机每次旋转 5° , 然后采集 100 次此时检偏角度所对应的探测器响应数据;

4) 为了减小随机误差的干扰, 对每个角度采集的 100 次探测器数据取平均, 作为当前检偏角探测器响应数据;

5) 重复步骤 3) 和步骤 4), 直到检偏角为 180° 完成采集, 最后通过上述步骤获取到 37 个检偏角度的偏振响应数据;

6) 先移除外部偏振片, 调节面源黑体温度为 15°C , 采集探测器响应数据, 保持黑体温度恒定, 重复步骤 2)~5), 采集低温时探测器所对应的响应数据。

2.2 非均匀性校正

表 1 列出了偏振集成红外探测器在三个不同黑体温度下, 通过公式 (15) 计算得到的探测器非均匀度 NU_{all} 参数。从表中可以看出: 偏振校正后, 探测器的非均匀度相较于未校正和响应校正分别降低了 98.14% 和 40.46%, 表明探测器本身存在比较严重的非均匀性。如果不对偏振集成红外探测器进行非均匀性校正, 其探测性能和图像质量将受到严重影响。

表 1 不同黑体温度下探测器的非均匀度

Tab.1 The non-uniformity of the detector at different blackbody temperatures

Data type	15 °C	25 °C	35 °C
Raw data	2.0800	2.1800	2.0900
Response correction data	0.0396	0.0388	0.0385
Polarization correction data	0.0233	0.0237	0.0226

此外,对于非均匀性较为显著的器件,像元间的响应差异大,盲元检测也会受到干扰,进而导致严重的误判。

2.3 像元响应曲线拟合

图 5 中的离散点为探测器实际响应数据,实线部分为最小二乘拟合数据。偏振集成红外探测器经过

非均匀性校正后,超像元归一化响应曲线如图 5(a)所示,图中最小二乘拟合数据实现了相位偏移的校正。四个不同检偏方向的像元响应差异小,其次不同通道间的响应范围相近,表明探测器的非均匀性得到了有效地校正。

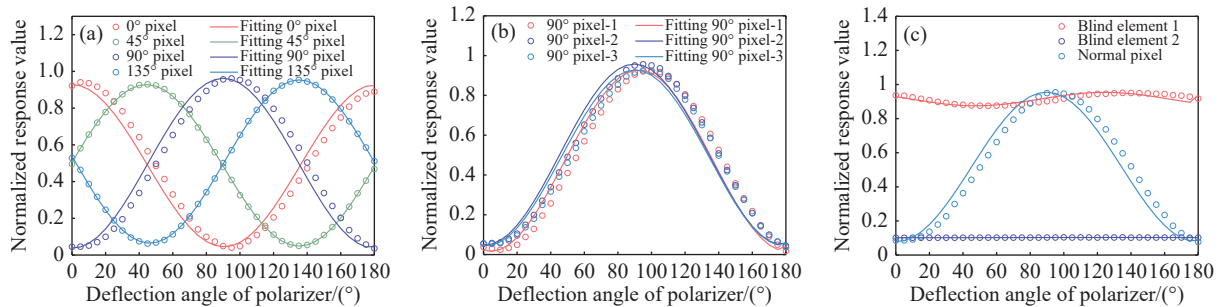


图 5 (a) 超像元响应曲线; (b) 同检偏方向不同像元响应曲线; (c) 正常像元与盲元的对比曲线

Fig.5 (a) Superpixel response curves; (b) Response curves of different pixels in the same detection direction; (c) Comparison curves of normal pixels and blind pixels

同一检偏方向下,不同像元的响应曲线如图 5(b)所示。尽管像元间响应的数值存在一定的差异,但是差异值较小。在原始离散点数据中,微偏振片与外部偏振片的检偏方向存在一定误差,因此拟合数据曲线需要进行相位偏移校正。图 5(c)所示为过热像元、死像元与正常像元的对比响应曲线。从图中可以看出:盲元的响应数值明显异于正常像元,因此正常像元之间的响应差异应在一个合理的阈值范围内,可以借助原始曲线与拟合曲线的方差判定。

采用文中提出的盲元检测方法,通过非线性最小二乘法拟合马吕斯响应曲线,计算原始响应曲线与标

准响应曲线的方差。图 5(b)中的三个像元为正常像元,像元 1、像元 2 和像元 3 的方差分别为 0.0055、0.0035 和 0.0054。而在图 5(c)中,盲元 1 的方差为 0.1554,盲元 2 的方差为 0.1330。基于盲元的响应特性,死像元完全不响应光强的变化,而过热像元响应异常高于正常像元;结合方差数据可以可知,正常像元和盲元间的方差差异显著。

2.4 基于曲线偏差的盲元检测

图 6 展示了国标法和文中方法的盲元检测结果。在国标法中,死像元标记为黑色,过热像元标记为橙色。在文中方法中,响应盲元标记为红色,偏振

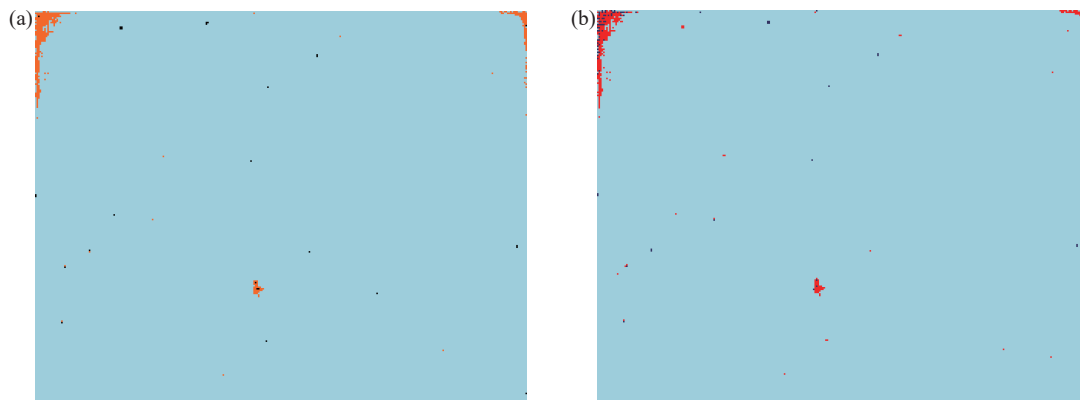


图 6 (a) 国标法检测死盲元和热盲元; (b) 文中方法检测响应盲元和偏振盲元

Fig.6 (a) Dead blind and thermal blind detected by the national standard method; (b) The response blind and polarization blind detected by the proposed method

盲元标记为深蓝色。根据两图盲元分布对比可知,死像元的位置基本一致,两种方法的盲元差异主要体现在过热像元和偏振盲元上。过热像元的判定跟像元的噪声电压相关,偏振盲元与响应的差异有关。因此,国标法会产生盲元漏检,而文中方法的盲元检测相比于国标法更加精确。

表 2 列出了文中方法各个通道实际曲线与标准曲线的方差均值,表 3 为不同方法盲元检测的盲元统计数据。国标法检测出来的响应盲元总数量为 542 个。文中方法检测盲元总数量为 573 个,包括响应盲元 563 个和偏振盲元 86 个,其中响应盲元和偏

振盲元重复个数为 76 个。文中方法与国标法检测的响应盲元重复个数为 535 个,占国标法总盲元数的 98.70%,表明文中方法对于死像元和过热像元识别的有效性。同时,文中方法还能够检测到国标法忽略的响应盲元和偏振盲元,对器件偏振成像中数据的非均匀性校正和盲元替换具有重要的应用价值。

表 2 文中方法盲元判定参数

Tab.2 The blind element determination parameters of the proposed method

Parameter	0°	45°	90°	135°
Mean(RSE)	0.006 9	0.007 1	0.006 3	0.006 2

表 3 盲元数据统计表

Tab.3 Blind metadata statistics table

Detect method	Blind element category	0°	45°	90°	135°
National standard method	Dead pixel	5	11	6	8
	Overheated pixel	129	126	133	124
	Total blind element	Total: 542, blindness rate: 0.662%			
The proposed method	Response blind element	140	142	146	135
	Polarization blind element	8	18	26	34
	Repetition number	6	17	23	30
	Total blind element	Total: 573, blindness rate: 0.699%			

2.5 基于偏振通道的近邻补偿和成像实验

偏振非均匀性校正和盲元检测完成后,图像中的盲元数据尚未校正,因此盲元补偿是数据预处理中一个重要的环节。文中采用的是近邻替代法,通过识别距离盲元最近的正常像元,用该正常像元的数值代替盲元处的数据。由于偏振集成红外探测器通常包含四个偏振方向通道(0°、45°、90°和 135°),不同偏振通

道所包含的偏振信息也有所区别。为了尽可能地保留原始的偏振信息,盲元补偿需要针对每个偏振通道单独进行处理,即基于偏振通道的近邻补偿。将探测器数据按照四个偏振方向分离;然后,在每个通道上,通过选取盲元周围最近的有效像元替代盲元的输出值;最后再根据通道的排布位置将数据还原。

图 7(a) 为原始的未处理图像,首先对图像进行非

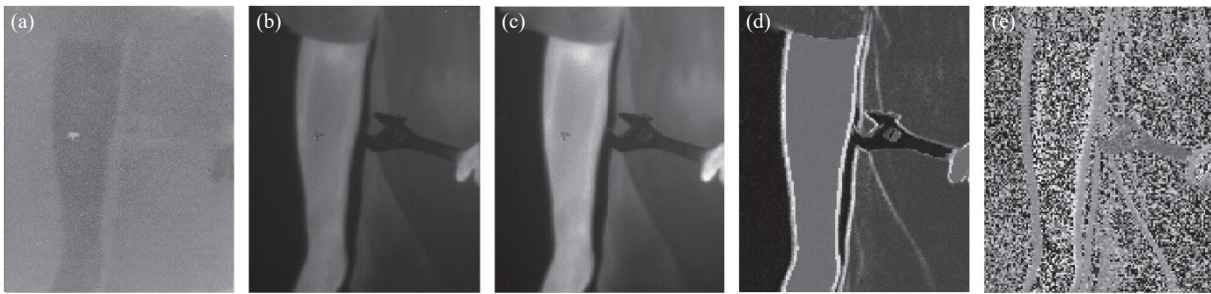


图 7 (a) 原始强度图像; (b) 国标法非均匀性校正和盲元替换后强度图像; (c) 文中法非均匀性校正和盲元替换后强度图像; (d) 偏振度图像; (e) 偏振角图像

Fig.7 (a) Original intensity image; (b) Intensity image after non-uniformity correction of the national standard method and blind pixel replacement; (c) Intensity image after non-uniformity correction of the proposed method and blind pixel replacement; (d) Polarization image; (e) Polarization angle image

均匀性校正,然后分别通过国标法和文中方法完成盲元检测,最后对图像进行盲元补偿,得到红外强度图像如图 7(b) 和图 7(c) 所示。国标法图像中仍存在部分像元呈现亮点和暗点,即存在未识别的盲元,产生漏检现象;并且图像整体的对比度被盲元拉低,在一定程度上影响了图像的成像质量。而在通过文中检测方法的成像图中,可以看出图像的质量有了明显的提升,特别是对比度。未观察到有未识别的盲元存在,图像中的人和物清晰可见。通过偏振像元采集的信息,结合斯托克斯矢量,完成了偏振度 (DoLP) 和偏振角 (AoP) 成像^[10],图 7(d) 和图 7(e) 分别为偏振度和偏振角图像。从图中可以看出:在偏振度图像中,人和金属扳手的边缘的偏振度数值较大;而在偏振角图像中,金属扳手的偏振角数值较为均匀,进一步凸显了人造物体。然而,偏振度和偏振角图像中仍存在信噪比较低、背景干扰大的问题。因此,后续还需要对偏振集成成像系统的噪声进行分析,并引入降噪算法,从而减小噪声对偏振信息的干扰。

3 结 论

文中首先分析了盲元的分类及产生原因,由于传统检测方法的局限性和焦平面非均匀性的影响,无法准确地判定响应盲元和偏振盲元。在非均匀性校正的基础上,提出了非线性最小二乘拟合马吕斯响应曲线,借助曲线偏差和拟合参数实现盲元检测。基于笔者课题组研制的偏振集成探测器进行了实验验证。曲线偏差检测响应盲元有 563 个,拟合参数检测偏振盲元有 86 个。结果表明,文中方法相比国标法可以更加精确地筛选盲元,在一定程度上减少漏检。最后进行了盲元补偿与成像工作,成像结果表明,偏振度成像更能凸显目标的边缘轮廓对比度。文中的偏振集成红外探测器数据预处理方法可为后续的高质量偏振成像探测提供参考。

参考文献:

- [1] LI X, LIU F, LIANG J. Advanced polarimetry and polarimetric imaging [J]. *Photonics*, 2024, 11(4): 317.
- [2] FAN Jinxiang YANG Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)
- [3] ZHOU Jian, ZHOU Yi, NI Xinyue, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 66-84. (in Chinese)
- [4] WANG Xia, XIA Runqiu, JIN Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- [5] ZHOU J, ZHOU Y, SHI Y, et al. A compact polarization-integrated long wavelength infrared focal plane array based on In As/GaSb superlattice [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2022, 65(2): 204-210.
- [6] WATANABE S. Terahertz polarization imaging and its applications [J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 58.
- [7] WANG Y, SU Y, SUN X, et al. Principle and implementation of stokes vector polarization imaging technology [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6613.
- [8] LEE J S, POTTIER E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 1-398.
- [9] WANG Lingfang, ZHOU Yi, ZHOU Jian, et al. Advances in on-chip infrared polarization imaging devices based on micro- and nano-structures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(5): 0501002. (in Chinese)
- [10] YI Jiaqi. Research on the key technologies of infrared division-of-focal-plane polarization imaging detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [11] HAO Lichao, HUANG Aibo, LAI Canxiong, et al. Discussion of reliability analysis on IRFPAs by bad pixel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504004. (in Chinese)
- [12] Institute of Electronic Industry Standardization, Ministry of Industry and Information Technology. Measuring method for parameters of infrared focal plane arrays: GB/T 17444-2013[S]. Beijing: China Standards Press, 2013. (in Chinese)
- [13] BAI Junqi, JIANG Yiliang, ZHAO Chunguang, et al. Blind-pixel detection algorithm for infrared focal plane array detector [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 233-235, 240. (in Chinese)
- [14] ZHOU Huixin, YIN Shimin, LIU Shangqian, et al. Algorithm of blind pixels auto-searching and compensation for IRFPA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 598-600. (in Chinese)
- [15] LIU Huitong, YI Xinjian. Two-point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 76-78. (in Chinese)
- [16] LIU Haizheng, SHI Zelin, FENG Bin. Mechanism and calibration of non-uniformity for IR polarization imagery obtained with integrated micro-polarizer array [J]. *Optics and*

- Precision Engineering*, 2018, 26(2): 480-491. (in Chinese)
- [17] XING Yanlei, CHEN Chen, DI Tianyang. Research on blind element detection method for an integrated infrared polarization detector [J]. *Infrared*, 2024, 45(6): 35-41. (in Chinese)
- [18] MA Hongliang, ZHENG Jianjie, LIU Qiang, et al. A multispectrum fitting program based on non-linear least-squares method for line parameters: application to $^{12}\text{CH}_4$ [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(12): 3887-3891. (in Chinese)
- [19] HOU Junfeng, WANG Dongguang, DENG Yuanyong, et al. Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1915-1922. (in Chinese)
- [20] POWELL S B, GRUEV V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21039-21055.

Data calibration and imaging for division-of-focal-plane polarization-integrated mid-wave infrared detectors

WANG Long^{1,2}, ZHOU Jian^{2,3*}, CAO Yaoyun^{1,2}, WANG Fangfang^{2,3}, YING Xiangxiao³, TANG Shouhai³,
WANG Lingfang¹, LIU Yunmeng^{2,4}, ZHOU Yi^{1,2,3*}, CHEN Jianxin^{1,2,3}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute of Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract:

Objective Due to the process defects of the micro-polarizer array and the matching error between the polarizer array and the focal plane array, the polarization modulation of the incident light with the same intensity and the same polarization direction is different, resulting in more blind pixels and more serious non-uniformity problems in the polarization integrated imaging system. Due to the influence of blind pixels and non-uniformity, infrared images will introduce noise, information loss and error increase. Therefore, the data preprocessing of polarization integrated detection system is particularly important.

Methods In this paper, the linear response model of the polarization detector is established. On the basis of the response correction, the parameters of the micro-polarizer are calibrated, and the polarization correction of the incident radiation is realized. A blind pixel detection method based on nonlinear least squares fitting Marius curve is proposed. The standard curves of each channel are calibrated. Using the curve deviation and fitting parameters, the simultaneous detection of response blind pixel and polarization blind pixel is achieved.

Results and Discussions The self-developed mid-wave infrared polarization integrated detector is used for experimental verification. The correction results show that the non-uniformity after polarization correction is reduced by 98.14% and 40.46% respectively compared with the original data and response correction data. 563 response blind pixels and 86 polarization blind pixels are detected. The imaging results show that the blind pixel recognition of this method is accurate, while the national standard method has the problem of blind pixel missed detection. The corrected polarization information can highlight the target contour of the imaging scene. The problem of the original data of the detector is effectively solved, which provides a reference for the data processing and polarization imaging quality improvement of the polarization integrated detector.

Conclusions This paper first analyzes the classification and causes of blind pixels. Due to the limitations of traditional detection methods and the influence of focal plane inhomogeneity, it is impossible to accurately determine the response blind pixels and polarization blind pixels. On the basis of non-uniformity correction, a nonlinear least squares fitting Marius response curve is proposed, and blind pixel detection is realized by means of curve deviation and fitting parameters. The experimental verification was carried out based on the polarization integrated detector developed by our research group. There are 563 response blind pixels detected by curve deviation and 86 polarization blind pixels detected by fitting parameters. The results show that the method in this paper can detect blind pixels more accurately than the national standard method, and reduce missed detection to a certain extent. Finally, the blind pixel compensation and imaging work are carried out. The imaging results show that the polarization imaging can better highlight the edge contour contrast of the target. The data preprocessing method of polarization integrated infrared detector in this paper can provide reference for subsequent high-quality polarization imaging detection.

Key words: polarization integrated detector; non-uniformity correction; response curve fitting; blind pixel detection; polarization imaging

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237); National Key R&D Plan (2022YFB3404405); The Pilot Project of Chinese Academy of Sciences (XDB0980000); Project of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Y202057); Shanghai Sail Project (22YF1455800, 21YF1455000); Natural Science Foundation of Shanghai (23ZR1473500, 23ZR1473100); Innovation Project of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); Supported by China Postdoctoral Science Foundation (2024M750687); Fund of State Key Laboratory of Infrared Detection Technology (IRDT-23-01)