

文章编号 1004-924X(2018)02-0480-12

微偏振片阵列红外成像非均匀性 产生机理及其校正

刘海峥^{1,2,3*}, 史泽林^{1,2}, 冯 斌^{1,2}

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院 光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:集成微偏振片阵列红外成像系统的偏振度图像对非均匀性高度敏感, 不经非均匀校正的偏振度图像存在较大误差。为了校正微偏振片阵列红外成像的非均匀性, 以入射光 Stokes 矢量形式, 建立了光电转换基本过程的偏振像素模型, 基于入射激励和辐射响应数据, 分析了微偏振阵列与红外焦面联合作用下非均匀性产生机理。提出一种基于多次辐射测量的矩阵形式的非均匀性校正方法, 该方法通过构造多组测量方程, 求解偏振像元的增益矢量, 由相邻四像元增益矢量组成超级像元的增益矩阵, 结合 Stokes 矢量提取矩阵, 逆向求解重构点的校正矩阵。实验数据表明: 该方法比两点法降低非均匀性约 5%~20%, 有效改善红外偏振度图像质量。

关键词:红外偏振成像; 微偏振片阵列; 非均匀性校正

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0480

Mechanism and calibration of non-uniformity for IR polarization imagery obtained with integrated micro-polarizer array

LIU Hai-zheng^{1,2,3*}, SHI Ze-lin^{1,2}, FENG Bin^{1,2}

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2. *Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, CAS, Shenyang 110016, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: liuhz@sia.cn*

Abstract: For an infrared imaging system integrated with a micro-polarizer array (MPA), DoLP (degree of linear polarization) images are extremely sensitive to non-uniformity. Therefore, large error will occur when the non-uniformity is not calibrated. In order to calibrate the non-uniformity, a polarized-pixel model for optoelectronic conversion process was constructed by taking the incident light as a Stokes vector, and the non-uniformity generation mechanism under the combined effect of a micro-polarizer array (MPA) and an infrared FPA was analyzed based on incident stimulation and radiation response data. A non-uniformity calibration (NUC) method was presented to solve the gain vectors of

收稿日期: 2017-06-20; 修订日期: 2017-09-05.

基金项目: 中国科学院创新基金 (No. CXJJ-16S027)

each polarized pixel by constructing multiple groups of measurement equations. The method constructed a gain matrix of a super pixel by using gain vectors from neighboring polarized pixels and joint Stokes extraction matrix to solve the NUC matrix inversely. The experimental results prove that the calibration method proposed reduces non-uniformity by 5–20%, and improves the quality of DoLP images effectively.

Key words: infrared polarization imaging; micro-polarizer array; non-uniformity calibration

1 引言

红外偏振成像技术是一种新的红外成像探测技术^[1-3],将光信息的维度从强度扩展到偏振维度。传统的红外成像探测是利用目标背景的表面温差,接收热红外辐射成像^[4-5]。偏振成像利用的是物体表面的偏振特性差异成像^[3, 6],人造目标较自然场景有更高的偏振度^[6-8],偏振成像可以利用这种高偏振度提升目标探测效率。红外偏振成像能够发现红外强度成像不能发现的一些人造目标,具备抗低温差、抗隐身和干扰等优势^[1, 9-11],成为当前光学成像探测的研究热点^[12-13]。

偏振成像系统可以分成分时系统和实时成像系统两大类,传统分时系统需要在探测器前安装可旋转偏振片的装置,结构大而复杂,会引入震动误差,非实时、笨重的缺点限制了分时系统的实际应用。实时偏振成像系统分为分振幅型、分孔径型、微偏振片阵列型。微偏振片阵列红外成像是在红外焦平面上集成微偏振片阵列(Micro-polarizer Array, MPA),MPA 由多组重复交叠的 22 的微偏振片单元组成,具备实时、体积小、结构紧凑的优点。与微偏振片阵列可见光系统相比,微偏振片阵列红外成像系统存在明显的非均匀性问题^[6, 14],本文针对微偏振片阵列红外偏振成像系统的非均匀性问题进行研究。

微偏振片阵列红外成像系统的非均匀性既有红外焦平面(Focal Plane Array, FPA)非均匀性,又掺杂了微偏振片阵列偏振调制作用不一致性(在此将其称作 MPA 的非均匀性)。FPA 非均匀性主要来源于焦面各像元光子响应非均匀性(Photo Response Non-Uniformity, PRNU)和固定图案噪声(Fixed-pattern Noise, FPN);MPA 的非均匀性主要源于微纳加工误差造成的相同检偏角度微偏振片检偏不一致性和与焦面集成时的装配误差。与微偏振片阵列可见光成像系统相

比,基于 MCT 或 InSb 等材料的红外探测器的焦面非均匀性远超出硅基材料的可见光探测器^[15, 16],在其上集成 MPA,红外偏振成像非均匀性现象更突出;所以整体上微偏振片阵列红外成像系统的非均匀性,比可见光系统更严重和复杂,不仅影响强度成像质量,还严重影响后续产出偏振度图像的质量,是红外偏振成像必须解决的问题。

集成 MPA 的成像系统其偏振度图像对系统非均匀性高度敏感,在提取偏振度信息之前必须进行非均匀性校正。Powell^[17]、Chen^[18]、Zhang^[19]、彭勇^[20]对集成 MPA 的可见光成像系统的非均匀性提出了有效的校正方法,针对集成 MPA 的红外成像系统的非均匀性问题许多学者开展了研究探索,但是目前公开发表的文献中还没有有效的校正方法。Hubbs^[21]在实验室内杜瓦环境下测量了和评估 DRS 研制的集成 MPA 的红外焦平面的辐射和偏振特性,目的是校正集成 MPA 的红外焦平面的非均匀性;Bowers^[22]研究了基于 MPA 的长波红外偏振成像非均匀性校正问题,其校正方法仅限于非偏振光的校正,缺乏像元和微偏振片的联合校正。本文研究基于 MPA 的红外偏振成像系统像元光电转换过程,分析均匀性的产生机理,建立偏振像元响应的数学模型,提出一种基于多次辐射测量的矩阵形式的非均匀性的校正方法。

2 微偏振片阵列红外成像系统非均匀性产生机理分析

2.1 微偏振片阵列红外偏振成像原理

在红外焦平面上集成微偏振阵列,每个像元严格对应一个微偏振片,构成偏振像元,整体组成偏振探测器。微偏振阵列由检偏角度依次相差 45°的微偏振片组成,假设相邻 2×2 象元入射光是均匀的且同轴,每 2×2 像元实现空间一点 4 个

偏振角通道下的偏振态测量,相邻 2×2 像元合成一个超级像元(SP)。要获取一幅偏振图像,首先需重构超级像元点处 Stokes 矢量,如图 1 所示。

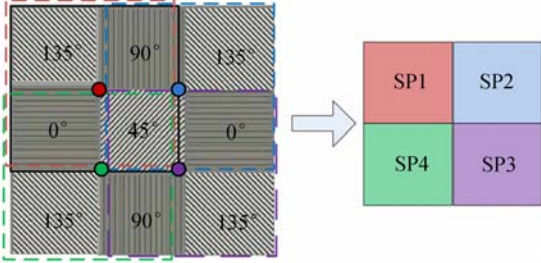


图 1 相邻四像元合成超级像元

Fig. 1 One super pixel consists of four neighboring pixels

MPA 由微线偏振片组成,不包含圆偏振片,计算中忽略圆偏振分量计算,超级像元 SP 的 Stokes 矢量计算公式如式(1)所示。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 分别表示重构点处相邻 4 个像元(分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 位置处)的辐射强度值;重构点处偏振度和偏振角公式计算如公式(2)所示:

$$\begin{aligned} \text{DoLP} &= \sqrt{s_1^2 + s_2^2} / s_0, \\ \text{AoLP} &= \frac{1}{2} \arctan(s_2 / s_1). \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 偏振像元数学模型

入射光经过微偏振片,微偏振片对入射光进行偏振调制,出射光被探测器像元接收,经过光电转换,转化为数字值。为方便分析,针对单一重构点,设定等强度的不同偏振态的入射光经相邻 2×2 像元光电转换为例进行分析,转换过程如图 2 所示:

影响系统非均匀性的主要环节是 MPA 偏振调制环节和像元的光电响应环节,图中(a)表示等强度的不同偏振态的入射光,灰度差别表示偏振态不同;(b)表示构成超级像元的相邻四个微偏振片阵列;(c)表示经微偏振片调制后的出射光,其偏振态和强度已改变;(d)表示探测器的像元,仅对强度进行积分响应;(e)表示经像元积分后的数字 DN 值。

图 2 中,对于其中单个微偏振片之前的入射

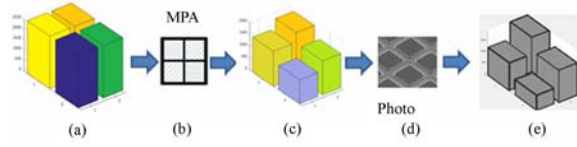


图 2 等强度不同偏振态入射光经相邻四像元光电转换过程

Fig. 2 Optoelectric conversion process of four neighbouring pixels which have equal intensity but different polarization states

光用 \mathbf{S}_m 表示,出射光用 \mathbf{S}_{out} 表示,微偏振片的作用可用穆勒矩阵 \mathbf{M} 表示:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_m = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \mathbf{S}_m, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{S}_m = (s_0^{in} \ s_1^{in} \ s_2^{in} \ 0)^T$, $\mathbf{S}_{out} = (s_0^{out} \ s_1^{out} \ s_2^{out} \ 0)^T$ 出射光的强度分量如式(4)所示。

$$s_0^{out} = m_{11} s_0^{in} + m_{12} s_1^{in} + m_{13} s_2^{in}. \quad (4)$$

探测器像元在积分时间内只对出射光强度进行响应,其计算公式如(5)所示。

$$I = G(s_0) s_0 \times d, \quad (5)$$

其中: I 表示像元响应值; $G(s_0)$ 表示该像元增益,是光强的非线性函数; d 表示像元暗电流;将式(4)代入式(5)得到公式(6)。

$$I - d = G(m_{11} s_0^{in} + m_{12} s_1^{in} + m_{13} s_2^{in}), \quad (6)$$

令 $k_x = G \times m_{1x}$ ($x=1, 2, 3$), 表示像素增益与对应微偏振片穆勒矩阵第一行元素乘积。式(6)转换为:

$$I - d = (k_1 \ k_2 \ k_3) \mathbf{S}_m = \mathbf{A}^T \mathbf{S}_m = \mathbf{S}_m \mathbf{A}, \quad (7)$$

其中: $\mathbf{A} = (k_1 \ k_2 \ k_3)$, 称为该偏振像元的增益矢量, $I - d$ 表示去除暗电流后的像素 DN 值,由于 $\mathbf{A}^T \mathbf{S}_m$ 乘积是数值标量,对其应用转置,不影响相乘结果。

从式(6)中可以看出,影响像元输出数字值主要是微偏振片、像元两个环节,其中 m_j 表示微偏振片作用特性, G 、 d 表示像元的响应特性,可以看出,像元响应值是入射光 Stokes 矢量在微偏振片特性和像元特性和像元特性联合作用下的数字输出。

2.3 系统偏振非均匀性机理分析

以下将从微偏振片特性和红外焦平面响应特性两方面分析其对系统整体非均匀性影响。

理想的微线偏振片的穆勒矩阵如式(8)所

示^[6],微偏振片阵列偏振成像系统 Stokes 矢量提取是基于理想微偏振片的假设。

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

$$\mathbf{M} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \cos 2\theta & \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \sin 2\theta & 0 \\ \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \cos 2\theta & \cos^2 2\theta + \frac{2\sqrt{qr}}{q+r} \sin^2 2\theta & (1 - \frac{2\sqrt{qr}}{q+r}) \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \sin 2\theta & (1 - \frac{2\sqrt{qr}}{q+r}) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \frac{2\sqrt{qr}}{q+r} \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中: q 是微线偏振片透偏方向透过率; r 是微线偏振片与透振方向交叉垂直方向透过率; $\Gamma = q/r$ 是微偏振片的消光比; θ 是微偏振片的检偏方向角; $\alpha = (q+r)/2$ 表示微偏振片的光学透过率, 小于等于 $1/2$; 只有当理想的线偏振片时, $q=1, r=0, \alpha=1/2$, 式(10)转化为式(8)。由式(10)计算出射光的强度:

$$s_0^{\text{out}} = \alpha \times s_0^{\text{in}} + (\alpha \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \cos 2\theta) \times s_1^{\text{in}} + (\alpha \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \sin 2\theta) \times s_2^{\text{in}}. \quad (11)$$

由式(11)可知,微偏振片的出射光强度受微偏振片的光学透过率、消光比、检偏角多个参数影响。不同微偏振片透偏特性随着检偏角 θ 显著不同,相同检偏角的微偏振片因制造加工瑕疵,存在消光比误差、透过率误差、偏振角排列误差。即使对于同一偏振态、同一强度的均匀入射光,经 MPA 中相同检偏角的微偏振片,出射光强度和偏振态存在差异,是非均匀的。

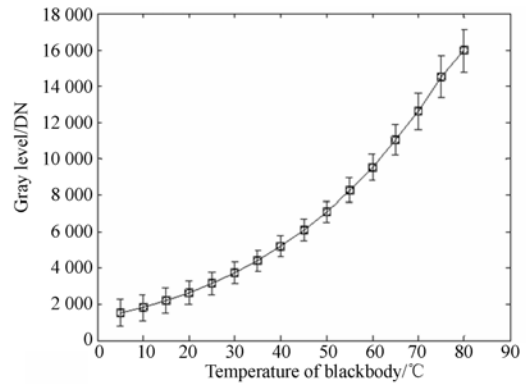
本文的系统在 $1/4$ 焦面集成 MPA, 采用在无 MPA 前置起偏器来产生入射偏振辐射激励, 通过无 MPA 的 $1/4$ 区域与集成 MPA 的区域面对不同温度黑体的辐射响应进行对比, 分析焦平面集成 MPA 前后的响应特性变化。如图 3(a) 所示为无 MPA 区域面对不同温度黑体的平均响应及其方差。可以看出: 总体上像元的辐射响应呈 γ ($\gamma > 1$) 形曲线特性, 说明像元的辐射响应呈现出很大的非线性; 方差显示: 对于同一辐射, 不同像元响应值分布范围较宽。图 3(b) 所示是无 MPA 区域面对不同温度黑体时的多个像元的辐射响应曲线。可以看出: 在较窄的温度辐射范围内, 像元响

经过某个像元位置的微偏振片的出射光强度由式(9)计算。

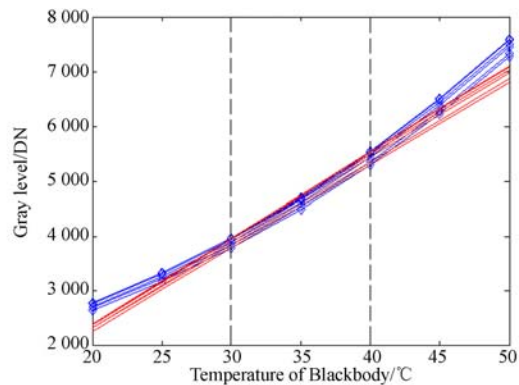
$$s_0^{\text{out}} = \frac{1}{2} s_0^{\text{in}} + \frac{1}{2} \cos 2\theta \times s_1^{\text{in}} + \frac{1}{2} \sin 2\theta \times s_2^{\text{in}}, \quad (9)$$

其中 θ 表示该位置的微线偏振片检偏角度(取值 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$), 真实微偏振片的特性如式(10)所示^[21, 23]

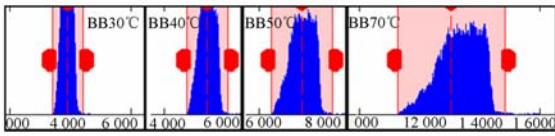
应近似线性, 可用两点标定的直线进行拟合。



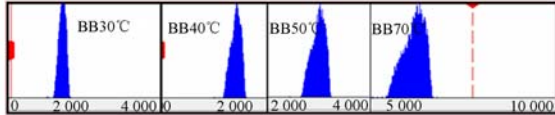
(a) 面对不同温度黑体, 无 MPA 区域平均响应及范围
(a) Response mean value and range of FPA without MPA when facing black body



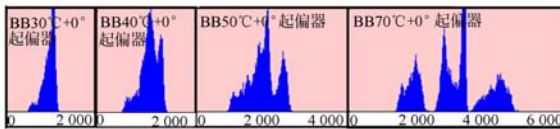
(b) 无 MPA 的 $1/4$ 焦面像元辐射响应曲线及两点线性近似
(b) Response curve of different pixel without polarizer when facing to blackbody, which can be fitted with line in two point narrow range



(c) 无 MPA 的 1/4 焦面对不同温度黑体辐射响应直方图
(c) Response histogram of 1/4 FPA without MPA when facing to blackbody



(d) 集成 MPA 的 1/4 焦面对非偏振辐射响应直方图
(d) Response histogram of 1/4 FPA with MPA when facing to blackbody



(e) 集成 MPA 的 1/4 焦面对偏振辐射响应直方图
(e) Response histogram of 1/4 FPA with MPA when facing to blackbody and PSG at 0°

图 3 红外探测器上有无 MPA 的焦面区域辐射响应比较
Fig. 3 Comparison of the response between 1/4 FPA area without MPA and 1/4 area integrated with MPA

图 3(c)中,无 MPA 区域面对均匀黑体,探测器响应呈连续近似高斯分布,且分布展宽较宽。图 3(d)中,对于非偏振辐射,集成 MPA 的区域响应直方图均值较无 MPA 的区域减小约一半,表明 MPA 对入射的非偏振辐射只有透过率的衰减作用,相比 3(c)直方图展宽变窄。图 3(e)中,当面对加入起偏器产生偏振辐射时,其强度约是无起偏器时的一半,集成 MPA 的区域响应直方图左移变小,同时直方图发生分化;当黑体温度升高时,经起偏器生成的偏振辐射增强,入射辐射中偏振辐射部分占比增大,MPA 的检偏作用凸显,原近似高斯直方图逐步分化成多峰直方图,整体响应范围变宽;从图中看出,集成 MPA 的焦面区域,其检偏能力随入射辐射偏振度增强而显著,同时探测器的响应值范围的变宽预示着探测器非线性表现会更为明显。这预示着集成 MPA 的红外

成像系统的非均匀性较传统红外成像系统非均匀性复杂,原有的多段两点校正方法适用条件需要改进。

分析经过微偏振片偏振调制后的光强分布差距,理想微偏振片的调制后的光强如式(12)所示:

$$s_0' = \frac{1}{2} s_0 [1 + \text{Dolp} \times \cos(\alpha - 2\theta)], \quad (12)$$

其中 α 表示入射光的线偏振方向角,出射光强取决于入射光强、入射光偏振方向角和微偏振片检偏角。均匀黑体在低温 T_1 和高温 T_2 下决定的辐射强度范围 $[s_0^{T_1}, s_0^{T_2}]$,经微偏振片后改变为 $[[0.5 \times (1 \pm \text{Dolp}) \times s_0^{T_1}, 0.5 \times (1 \pm \text{Dolp}) \times s_0^{T_2}]$,到像元上的辐射的最大范围为 $[[0.5 \times (1 - \text{Dolp}) \times s_0^{T_1}, 0.5 \times (1 + \text{Dolp}) \times s_0^{T_2}]$,只要保证探测器响应在该范围内满足线性近似条件,可用沿用公式(5)建立偏振像元数学模型,该范围的确定可以通过恰当选择两点温度范围和起偏器实现。

根据目标偏振特性的研究^[7],自然界中人造目标偏振度一般不超过 10%,通过合理的划分探测器响应区间,可以找到合适的两点,使得场景辐射经 MPA 偏振调制后的辐射范围处于两点区间内,满足线性近似条件,实现红外焦平面非均匀性和 MPA 偏振非均匀性的联合校正。

实验室内利用黑体+起偏器产生红外偏振辐射。通过旋转起偏器生成不同偏振角的偏振辐射。考察微偏振片阵列系统对不同偏振辐射的响应及其他因素的影响。图(4)是 50 °C 黑体辐射经起偏器时,4 个检偏角的灰度响应均值及范围,随起偏器旋转形成的曲线。

图(4)从灰度响应范围看,均匀偏振入射光经相同检偏角的微偏振片后光强变化浮动大,这无疑会放大像元响应非线性效应。从起偏器随着旋转角度的响应看,微偏振片阵列不同检偏角整体上响应呈正弦曲线变化,幅度和范围分布近乎一致。从曲线 Y 轴整体偏移量看,探测器响应中除像元自身的暗电流外,还包含着无法避免的非偏振辐射影响,这部分非偏振辐射一部分来自镜头自身的热辐射、起偏器的热辐射和热反射,同时还有 MPA 与 FPA 集成中串音的影响。与微偏振

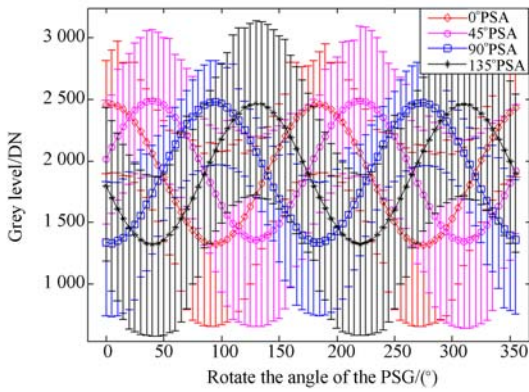


图 4 黑体 50 °C,起偏器旋转 0°~360°,探测器 MPA 区域 4 个检偏角的响应均值及范围

Fig. 4 Response mean value and range of four PSA channels when BB 50 °C and the PSG rotate from 0° to 360°

片阵列可见光成像相比,红外探测器暗电流和入射辐射不易标定,且起偏器易反射探测器冷屏辐射,造成本底图像存在锅底现象。这些问题都是在联合校正过程中需要考虑的问题。

3 微偏振片阵列红外成像非均匀性校正方法

3.1 微偏振片阵列红外成像非均匀性校正方法

微偏振红外成像系统非均匀校正目的是使偏振探测器像元,对于同一强度均匀入射光,使其强度响应在同一灰度上,对同一偏振态的入射光,计算出的偏振态(偏振度、偏振角)在同一水平上。具体实现上,可以测量高低温下多组起偏角时的本底图像,参考公式(7)构造多组线性方程组,形式如下式(13):

$$I = \begin{pmatrix} I_{PSG_N} \\ I_{PSG_000} \\ I_{PSG_045} \\ I_{PSG_090} \\ I_{PSG_135} \end{pmatrix}_T = \begin{pmatrix} S_{PSG_N}^T \\ S_{PSG_000}^T \\ S_{PSG_045}^T \\ S_{PSG_090}^T \\ S_{PSG_135}^T \end{pmatrix}_T A + d, \quad (13)$$

其中: I_{PSG_N} 表示无起偏器像素灰度值, $I_{PSG_θ}$ 表示起偏器起偏角度为 $θ(0°、45°、90°、135°)$ 时的像素灰度值, $S_{PSG_θ}^T$ 表示对应的起偏器角度的入射光 Stokes 矢量值, A 是该偏振像元的增益矢量, d 表

示该像素的暗电流灰度。

与微偏振片阵列可见光成像校正相比,红外偏振入射光的精确构造存在难度,黑体前安置线偏振片产生偏振入射光的同时,会引入偏振片自身发射和周围辐射反射,如图 5 所示,进入 MPA 的入射辐射包括来自系统外的穿过起偏器的黑体辐射、起偏器自发辐射、起偏器反射周围的辐射,同时还包含系统镜头的自身辐射。这些来自成像系统内和系统外的未知红外辐射都会影响入射辐射的精度,会给后续校正引入误差,同时由黑体加起偏器生成的偏振辐射与起偏器表面的自发辐射和反射辐射偏振光相抵消,会减少偏振度信号,降低偏振测量的信噪比。

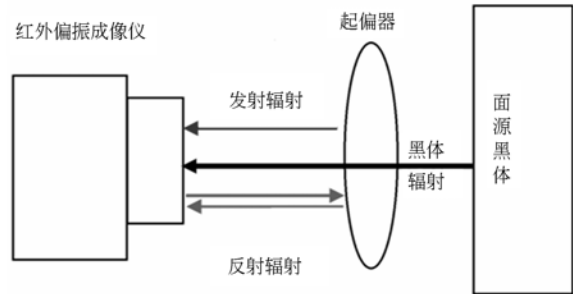


图 5 构造入射偏振辐射的实验设置引入的外部干扰辐射

Fig. 5 External interference radiation introduced by experimental setting of incident polarization radiation

为了克服以上问题,可通过同一起偏角下,高低温本底方程组作差方式求解,作差有利于消除上述不利因素的影响,具体如式(14. a)所示:

$$\begin{pmatrix} \Delta I_{PSG_N} \\ \Delta I_{PSG_000} \\ \Delta I_{PSG_045} \\ \Delta I_{PSG_090} \\ \Delta I_{PSG_135} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{PSG_N}^T \\ S_{PSG_000}^T \\ S_{PSG_045}^T \\ S_{PSG_090}^T \\ S_{PSG_135}^T \end{pmatrix} A, \quad (14. a)$$

$$A = \begin{pmatrix} S_{PSG_N}^T \\ S_{PSG_000}^T \\ S_{PSG_045}^T \\ S_{PSG_090}^T \\ S_{PSG_135}^T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta I_{PSG_N} \\ \Delta I_{PSG_000} \\ \Delta I_{PSG_045} \\ \Delta I_{PSG_090} \\ \Delta I_{PSG_135} \end{pmatrix}, \quad (14. b)$$

式中: ΔI 表示原始像元的差分灰度, $\Delta \mathbf{S}^T$ 表示差分 Stokes 矢量。

采用 4 个相邻像元合成超级像元, 4 个相邻像元的灰度值是构成计算重构点入射光 Stokes 矢量的测量分量, 其转换关系如公式(15)所示。

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{S}_m = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0^T \\ \mathbf{A}_{45}^T \\ \mathbf{A}_{90}^T \\ \mathbf{A}_{135}^T \end{pmatrix}, \quad (15)$$

其中: I_ϕ 表示构成超级像元的 2×2 单元中各检偏角位置像元像素灰度值, 下标角度 ϕ 表示微偏振片检偏角度, $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$ 是 $I_\phi (\phi=0, 45, 90, 135)$ 分量组成的测量矢量, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{4 \times 3}$ 是由相邻 4 个偏振象元的 \mathbf{A} 构成的增益矩阵。由测量分量 I_ϕ 到超级像元的 Stokes 矢量的计算如式(16):

$$\mathbf{S}_c = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{I}, \quad (16)$$

其中: \mathbf{S}_c 是重构点处的 Stokes 矢量测量值, $\mathbf{T} \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$ 表示由 \mathbf{I} 提取 \mathbf{S}_c 的提取矩阵, 式(15)代入式(16)得到式(17):

$$\mathbf{S}_c = \mathbf{T} \mathbf{I} = (\mathbf{T} \mathbf{A}) \mathbf{S}_m, \quad (17)$$

求 \mathbf{S}_m , 得到校正公式(18):

$$\mathbf{S}_m = (\mathbf{T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{S}_c, \quad (18)$$

令 $\mathbf{P} = \mathbf{T} \mathbf{A}$, $\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} = (\mathbf{T} \mathbf{A})^{-1}$ 则校正模型为:

$$\mathbf{S}_m = \mathbf{W} \mathbf{S}_c, \quad (19)$$

式中 \mathbf{S}_m 是重构点处所求入射光矢量的估计, $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是由测量 Stokes 矢量到估计 Stokes 矢量的校正矩阵, 该矩阵综合微偏振片的偏振特性、像元响应特性、Stokes 矢量提取方式多种因素。其中 \mathbf{A} 表征构成超级像元的 4 个相邻微偏振片的偏振作用特性和探测器的响应特性, 表征 Stokes 提取方式。

3.2 所用的红外偏振成像系统及实验布局

本实验采用微偏振片阵列中波红外成像系

统, 微偏振片阵列集成在 $1/4$ 红外焦平面(FPA)上, $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 微偏振片重复交替排列, 如图 6 所示。原始图像的测量 Stokes 矢量采用公式(1)计算。

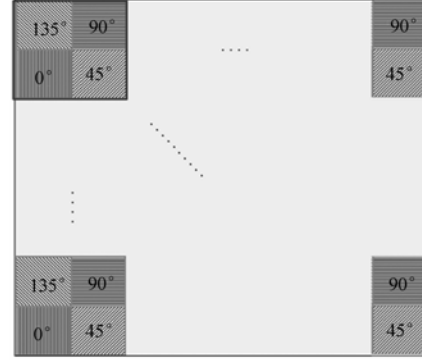


图 6 微偏振片阵列排列

Fig. 6 Layout of MPA

为校正该系统非均匀性, 本文搭建一套红外偏振成像非均匀性校正实验系统, 系统包含面源黑体、高精度可旋转角度转台、大尺寸高性能红外线性偏振片和微偏振片阵列中波红外成像系统。通过黑体温度控制器可设定面源黑体温度, 大尺寸线偏振片安装在角度旋转台上, 构成可旋转起偏器, 系统还包括带有 LVDS 数据采集系统的工业便携式计算机, 可实时获取图像数据, 系统布置如图 7 所示:

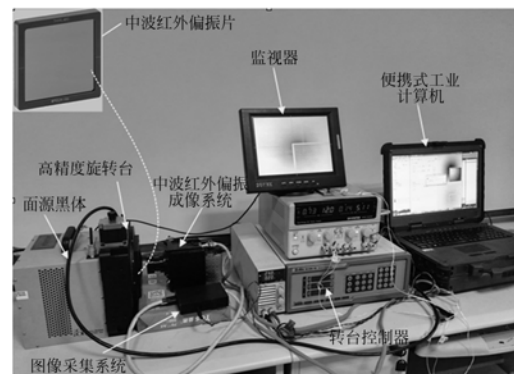


图 7 采集本底试验现场布局

Fig. 7 Experimental setup for acquisition of flat-field data

试验中所采用的实验设备参数如表 1 所示。

表 1 实验设备参数

Tab. 1 Physical parameters of experimental setup

设备	参数项	取值/范围
面源黑体	温度/°C	-40~110
起偏器偏振片	尺寸/mm	50×50
	波长/ μm	3-5
高精度旋转台	旋转角度/(°)	0~360
	精度/(°)	0.001 25
镜头	焦距/mm	45.7
	F 数	2
	波段/ μm	3-5
	视场/(°)	12×9.6
微偏振片阵列	阵列	160×128
	周期/nm	400±20
	线宽	200±10
	基底材料	GE
探测器	光栅	AL
	阵列	320×256
	波段/ μm	3.7~4.8
	像元尺寸/ μm	30×30
	积分时间/ms	2
	增益/dB	0
	A/D 位/bit	14

3.3 原始本底数据采集及校正流程

采集自然光和偏振光原始平场辐射数据(本底),数据处理及校正流程如下:

(1)采集高温和低温自然光本底,所谓自然光本底,就是黑体辐射不经起偏器,直接投射在系统视场内,每一本底采集 200 幅,数据深度 14 位,30 f/s;

(2)采集高温和低温偏振光本底。黑体温度分别设为高温或低温,控制起偏器旋转到指定角度(0°、45°、90°、135°)。每一本底采集 200 幅,数据深度 14 位,30 f/s;

(3)对每组本底数据 200 幅取平均,形成单幅本底,目的消除时域噪声对本底的影响;

(4)计算每幅校正本底的入射 Stokes 矢量,方法是将一个本底上的所有相同检偏角位置像素取平均,根据公式(1)计算入射 Stokes 矢量;

(5)构造强度响应方程,本实验中,采集 10 组本底,相应得到 10 组入射辐射 STOKES 估计。参照公式(13)建立 10 组方程;

(6)高温组方程和低温组方程对应相减,得到差分方程组;

(7)求解差分方程组,得到每个偏振像元处;

(8)构造超级像元的 A 矩阵,参照式(15),由每个偏振像元的增益矢量 A 构造 A 矩阵;

(9)求每个重构点的校正矩阵 W。根据公式 $W=(TA)^{-1}$ 求超级像元处的逆矩阵;

(10)应用校正矩阵校正图像。具体过程:首先原始图像去除暗电流本底,其次计算每个重构点处的 Stokes 测量矢量,再次应用式(19)进行校正计算得到入射 STOKES 矢量估计;

(11)采用相邻 4 个 Stokes 矢量估计进行插值,得到原始像元位置点的 Stokes 矢量;

(12)最后应用式(2)计算偏振度。

4 非均匀校正实验结果

4.1 实验室均匀本底校正结果

本文采集 10 组本底数据用于计算校正矩阵,2 组无偏振自然辐射本底数据(黑体 35 °C,45 °C)和 8 组偏振入射辐射(黑体 40 °C,60 °C,偏振角分别为 0°、45°、90°、135°)本底数据。采集 40 °C 的各种偏振态(0°、45°、90°、135°)入射辐射图像进行矩阵法校正测试,并将校正结果与传统两点校正方法进行比较,结果显示矩阵校正法校正更均匀,如图 8、图 9 所示。

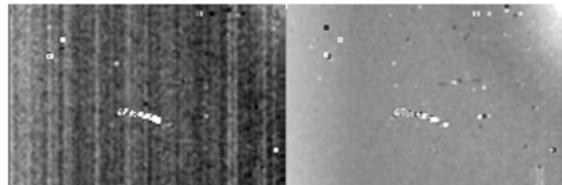
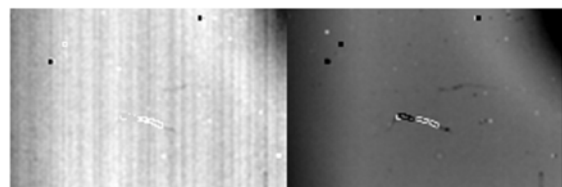


图 8 T45 °C & P45 °C 强度图像校正结果(左:两点法,右:矩阵法)

Fig. 8 Example for correct a raw 45 °C & P45 °C radiation image. Left: Radiation image after two point calibration; Right: Radiation image after matrix calibration



T45 °C & P45 °C 偏振度图像校正结果(左:两点法,右:矩阵法)

Fig. 9 Example for correct a raw 45 °C & P45 °C radiation image. Left: DoLP image after two point calibration; Right: DoLP image after matrix calibration

为量化比较非均匀校正效果,采用平均值和方差来衡量校正效果。

$$P = \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P(i,j)}, \quad (20)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M * N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [P(i,j) - \bar{P}]}, \quad (21)$$

$$NU = \frac{\sigma}{\bar{P}}, \quad (22)$$

其中: M 和 N 分别表示图像的行数和列数, d 和 h 分别表示死像元和过热像元数目, $P(i,j)$ 表示图像 (i,j) 处的像素值, \bar{P} 表示整幅图像的平均值, σ 表示图像方差, NU 表示图像的非均匀性。

表 2 不同平场入射光下非均匀性校正方法的比较

Tab. 2 Comparison between two NUC methods under different flat field incident light

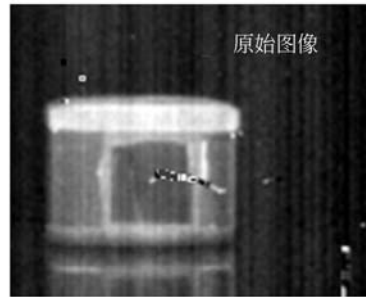
黑体 / °C	起偏器 角度 / (°)	两点强 度 / 方差	矩阵强 度 / 方差	两点 DOLP / 方差	矩阵 DOLP / 方差
40	0	3 745.6	3 329.2	0.098	0.120
		135.1	119.2	0.084 2	0.078 2
	45	3 741.4	3 325.7	0.085 6	0.118
		140.5	122.8	0.033 1	0.026
90	3 732.9	3 315.1	0.107	0.107	
		140.5	123.8	0.024 1	0.018 1
	135	3 729.9	3 311.5	0.110	0.098
35	无 PSG	134.4	120.2	0.083 4	0.081 7
		3 902.4	3 485.3	0.016 3	0.014 4
		79.1	70.8	0.010	0.008
60	0	4 280.0	3 863.6	0.151 1	0.178 9
		136.8	120.7	0.016 3	0.010 7
	45	4 276.5	3 861.6	0.141 6	0.179 2
		140.7	124.2	0.0185	0.010 9
90	4 267.6	3 848.6	0.165 0	0.170 9	
		140.7	126.5	0.017 4	0.012 0
	135	4 270.2	3 849.9	0.157 9	0.153 0
45	无 PSG	134.6	123.2	0.018 0	0.011 0
		4 236.2	4 218.4	0.014 0	0.014 2
		79.2	84.6	0.010 9	0.008

对于部分线偏振入射光,矩阵校正法相比于两点校正,偏振度图像的均匀性有了较大地提升,强度图像非均匀性接近,偏振度图像非均匀性降低约 5%~20%,总体上,矩阵校正法能够明显降

低偏振度图像的非均匀性。

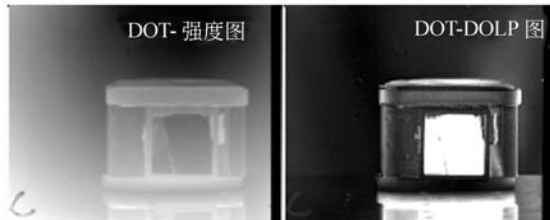
4.2 实验室校正结果

利用无微偏振片的 1/4 焦面,旋转起偏器构



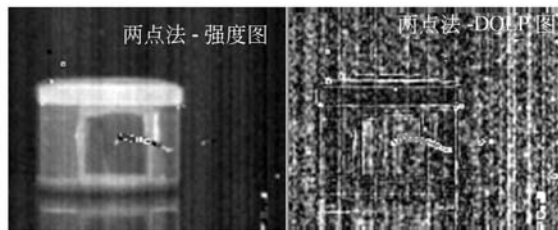
(a) 原始图像

(a) Raw image outputted by MPA system



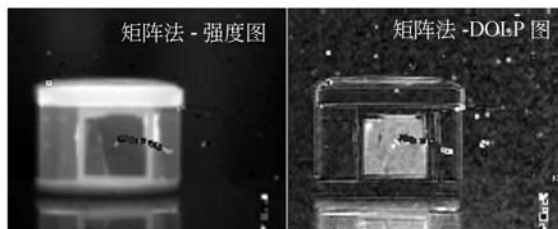
(b) 分时系统(左:灰度图像,右:偏振度图像)

(b) Acquired Captured images by DOT system which are takes as references. Left is intensity image and right is DOLP image



(c) 两点法(左:灰度图像,右:偏振度图像)

(c) Result image calibrated by two point method. Left is intensity image and right is DOLP image



(d) 矩阵法(左:灰度图像,右:偏振度图像)

(d) Result images calibrated by our matrix method. Left is intensity image and right is DOLP image

图 10 MPA 输出校正图像和分时系统输出比较

Fig. 10 Produced images comparison between MPA polarization system and DOT system

成分时偏振成像系统,采集到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振角下的数据,重构得到入射 Stokes 数据,计算强度图像和偏振度图像,分时系统相对微偏振片阵列系统,非均匀性误差小,更接近于理想成像效果;利用带微偏振片的 $1/4$ 焦面,采集原始微格栅图像,分别采用两点校正法和矩阵校正法进行校正对比。

图中第一行为原始微格栅图像。第二行为分时系统得到的强度图像和偏振度图像,第三行为两点法校正得到强度图像和偏振度图像,第四行为矩阵校正方法得到的强度图像和偏振度图像;对比可以发现,矩阵校正方法更接近分时系统的结果,证明本文的校正方法更有效。

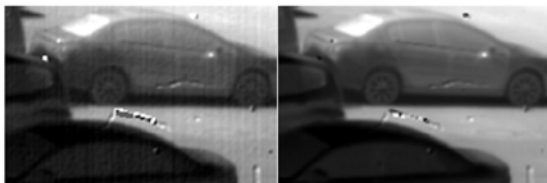
4.3 外景校正结果

将温度区间为 40°C 、 60°C 的校正矩阵应用于室外测试场景和室内场景,校正效果如图 11、图 12 所示。



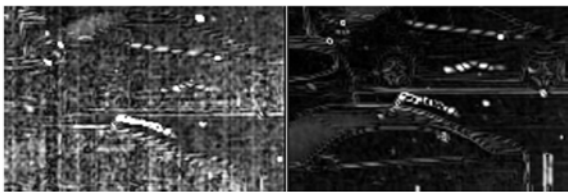
(a) 原始图像

(a) Raw image outputted by MPA system



(b) 强度图象(左:两点法,右:矩阵法)

(b) Radiation image. Left is two point calibration and right is our matrix method

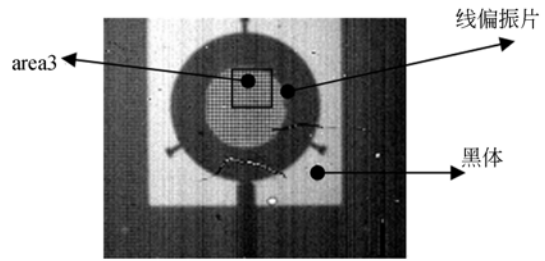


(c) 偏阵度图象(左:两点法,右:矩阵法)

(c) DoLP images. Left is two point calibration and right is our matrix method

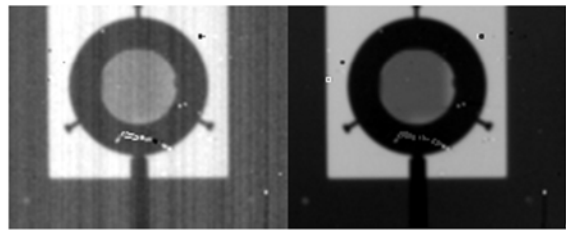
图 11 外景两点法和矩阵法校正结果比较

Fig. 11 Scene compareion betewwn two points calibration and our matrix method



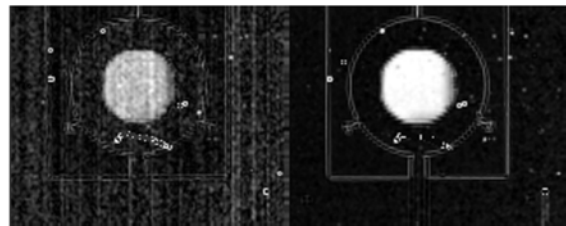
(a)原始微格栅图像

(a)Raw micro-grid image



(b)强度图象,左:两点法,右:矩阵法

(b) Intensity image. Left is two point calibration and right is our matrix method



(c)偏阵度图象,左:两点法,右:矩阵法

(c) DoLP images. Left is two point calibration and right is our matrix method

图 12 实验室两点法和矩阵法校正结果比较

Fig. 12 Labroatory comparation between two points calibration and our matrix method

为了量化比较矩阵校正方法与两点法校正效果,选取两个不同偏振目标区域,如图 11(a)、图 12(a)中所示,分别比较强度方差和偏振度方差,如表格 3 中所示,结果优于两点法。分析其中原因:矩阵校正方法综合考虑了微偏振片的作用特性和像元的响应特性,两点法只涉及到强度的校正,校正中微偏振片只考虑了透过率的校正,没有兼顾检偏角、消光比的校正。当面对偏振场景时,两点法会暴露出对偏振光校正的不足。

表 3 在实景条件下非均匀校正方法比较

Tab. 3 Comparison between different NUC methods under condition of real scene

区域	两点强度	两点 DOLP	矩阵强度	矩阵 DOLP
	方差	方差	方差	方差
area 1	36.3	0.063 8	25.5	0.008 1
area 2	99.3	0.020 2	92.3	0.011 6
area 3	36.1	0.011 5	25.81	0.004 4

5 结 论

本文从微偏振片阵列红外成像环节入手,研究了基于 STOKES 光矢量形式的光电成像过程,

参考文献:

- [1] 段锦,付强,莫春和,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 190-195.
DUAN J, FU Q, MO CH H, *et al.*. Review of polarization imaging technology for international military application[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 190-195. (in Chinese)
- [2] 姜会林,付强,段锦,等. 红外偏振成像探测技术及应用研究[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 345-349.
JIANG H L, FU Q, DUAN J, *et al.*. Research on infrared polarization imaging detection technology and application[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 345-349. (in Chinese)
- [3] 聂劲松,汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 63-67.
NIE J S, WANG ZH. Summarize of infrared polarization imaging detection technology[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2):63-67. (in Chinese)
- [4] ACCETTA J S, SHUMAKER D L. *The Infrared and Electro Optical Systems Handbook*[M]. SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [5] 蔡毅,王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.
CAI Y, WANG L X. Nine issues associated with infrared imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(11): 671-682. (in Chinese)
- [6] 牛继勇,李凡民,马莉祥. 目标红外偏振探测原理及特性分析[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 215-220.
NIU J Y, LI F M, MA L X. The Principle and characteristics analysis of IR polarization detection [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3):215-220. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, HAN J T, LI J CH, *et al.*. GONG Ting. Characteristics analysis of infrared polarization for several typical artificial objects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9244: 92440I.
- [8] TOOLEY R D. Man-made target detection using infrared polarization[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1166.
- [9] 莫春和,段锦,付强,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 265-270.
MO CH H, DUAN J, FU Q, *et al.*. Review of polarization imaging technology for international military application (II) [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 265-270. (in Chinese)
- [10] 孙秋菊,王鹏,黄文霞. 红外偏振成像在伪装目标识别中的应用研究[J]. 红外, 2016, 36(1): 18-22.
SUN Q J, WANG P, HUANG W X. Application of infrared polarization imaging in camouflage detection[J]. *Infrared*, 2016, 36(1): 18-22. (in Chinese)
- [11] GOUDAIL F, TYO J S. When is polarimetric imaging preferable to intensity imaging for target detection[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(1): 46-53.
- [12] 范晋祥,杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.
FAN J X, YANG J Y. Development trends of infrared imaging detecting technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)

- [13] 王霞,夏润秋,金伟其,等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
WANG X, XIA R Q, JIN W Q, *et al.*. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- [14] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [15] 余毅,常松涛,王旻,等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1932-1938.
YU Y, CHANG S T, WANG M, *et al.*. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1932-1938. (in Chinese)
- [16] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [17] POWELL S B, GRUEV V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21039-21055.
- [18] CHEN ZH Y, WANG X, LIANG R G. Calibration method of microgrid polarimeters with image interpolation[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 995-1001.
- [19] ZHANG J CH, LUO H B, HU B, *et al.*. Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7236-7240.
- [20] 彭勇,冯斌,史泽林,等. 微偏振片阵列成像的非均匀校正研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 404004.
PENG Y, FENG B, SHI ZH L, *et al.*. Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 404004. (in Chinese)
- [21] HUBBS J E, GRAMERA MARK E, MAESTAS-JEPSON D, *et al.*. Measurement of the radiometric and polarization characteristics of a microgrid polarizer infrared focal plane array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6295: 62950C.
- [22] BOWERS D L, BOGER J K, WELLEMS D, *et al.*. Unpolarized calibration and nonuniformity correction for long-wave infrared microgrid imaging polarimeters[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(4): 046403.
- [23] BOWERS D L, BOGER J K, WELLEMS L D, *et al.*. Evaluation and display of polarimetric image data using long-wave cooled microgrid focal plane arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6240: 62400F.

作者简介:



刘海峥(1979—),男,宁夏银川人,博士研究生,副研究员,2002年于东北大学获得学士学位,2009年于中科院沈阳自动化研究所获得硕士学位,主要研究方向:红外成像、图像处理。E-mail: liuhz@sia.cn

导师简介:



史泽林(1965—),男,江苏宜兴人,博士生导师,研究员,1990年于西安电子科技大学获得硕士学位,2005年于中科院沈阳自动化研究所获得博士学位,研究方向:光电成像、光电跟踪、图像处理、目标识别。E-mail: zlsh@sia.cn