

# 近红外偏振探测器的定标及非均匀性校正

尹佳琪<sup>1,2,3</sup>, 王世勇<sup>1,3</sup>, 张瑞<sup>1,2,3</sup>, 李范鸣<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 首先介绍了偏振探测器的结构, 建立了探测器的信号响应模型, 并基于该响应模型制定了相应的参数定标方案, 实现了对入射辐射偏振态的高精度计算和对偏振图像的非均匀性校正。实验数据表明, 校正后计算得到的线偏振度是真实值的 97.8%~101.5%, 满足了偏振探测的精度要求; 强度图像和线偏振度图像相对于未校正图像的非均匀性分别降低了 93.64% 和 93.67%, 有效提高了图像质量。

**关键词:** 近红外; 偏振探测器; 偏振定标; 非均匀性校正

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## Calibration and non-uniformity correction of near-infrared polarization detector

YIN Jia-Qi<sup>1,2,3</sup>, WANG Shi-Yong<sup>1,3</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2,3</sup>, LI Fan-Ming<sup>1,3\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The structure of the polarization detector is introduced firstly, the signal response model of the detector is established. Based on the signal response model, the corresponding parameter calibration scheme is made. High-precision calculation of polarization states of incident radiation and non-uniformity correction of polarization image are realized. The experimental data show that the calculated linear polarization is 97.8% ~ 101.5% of the true value after calibration, which meets the accuracy requirements of polarization detection. The non-uniformity of intensity image and linear polarization image has been reduced by 93.64% and 93.67% respectively compared with the uncorrected image, and the image quality has been effectively improved.

**Key words:** near infrared, polarization detector, polarization calibration, non-uniformity correction

**PACS:** 07.57.Kp

## 引言

偏振是光的一个基本特征<sup>[1]</sup>。偏振图像可以从场景中获取目标场景的矢量信息, 提供强度和光谱图像无法获取的目标信息<sup>[2]</sup>。偏振探测技术在环境

监测<sup>[3]</sup>、图像去雾<sup>[4]</sup>、生物医学<sup>[5]</sup>、遥感<sup>[6]</sup>等领域有着广泛的应用。目前, 偏振成像系统主要包括分时、分振幅、分孔径、焦平面等类型。焦平面偏振探测器具有实时好、紧凑的结构和高可靠性等优势, 但

收稿日期: 2019-05-21, 修回日期: 2019-11-06

Received date: 2019-05-21, Revised date: 2019-11-06

基金项目: 国家十三五国防预研项目(Jzz2016-0404/Y72-2), 上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2017xcwzk08)

**Foundation items:** Supported by National Thirteen Five national defense research Foundation (Jzz2016-0404/Y72-2), Key Laboratory of Shanghai Field Physical Evidence funded Foundation (2017xcwzk08)

**作者简介 (Biography):** 尹佳琪 (1993-), 男, 安徽枞阳人, 博士研究生, 主要研究领域为偏振成像、图像处理. E-mail: yinjiaqi@mail.ustc.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lfmjws@163.com

是存在明显的非均匀性问题<sup>[7]</sup>。

焦平面偏振探测器的非均匀性严重影响了偏振信息的计算和偏振图像的质量,因此必须对探测器参数进行标定和非均匀性校正。Powell<sup>[8]</sup>、Huang F<sup>[9]</sup>和Feng B<sup>[10]</sup>等采用最小二乘法,刘海峥<sup>[11]</sup>和彭勇<sup>[12]</sup>等采用矩阵法标定了偏振探测器的参数,提高了偏振探测器的探测精度和偏振图像的均匀性。但是探测器的响应与入射辐射不是完全呈线性关系,在不同的工作环境中探测器的参数是不同的,需要多次定标,大大增加了校正的工作量。本文基于近红外线列偏振探测器的特点,建立了偏振探测器像元的响应模型,并根据偏振探测器的响应模型制定了对探测器参数的定标方案,提出了响应非均匀性和微偏振片参数不一致性分别校正的方法。

## 1 偏振探测器模型

### 1.1 近红外线列偏振探测器

焦平面偏振探测器是将微偏振片阵列直接集成到探测器的焦平面上,每个像元对应着一个微偏振片,构成偏振像元。在偏振像元阵列中,将4个(2×2)相邻的像元组合成一个超像元,如图1所示,四个像元对应的微偏振片分别是0°、45°、90°、135°的金属光栅,用于测量偏振光在这四个角度的线偏振光分量,分别记为 $I_0$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{135}$ ,并采用这四个强度值计算Stokes矢量 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2]^T$ ,如式(1)所示。

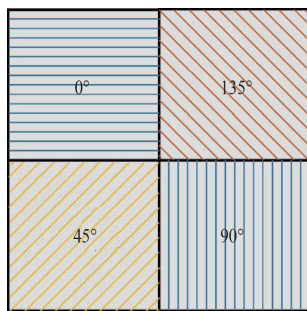


图1 相邻的四像元合成超像元

Fig. 1 One super-pixel consists of four neighboring pixels

$$\begin{aligned} S_0 &= 0.5(I_0 + I_{90} + I_{45} + I_{135}) \\ S_1 &= I_0 - I_{90} \\ S_2 &= I_{45} - I_{135} \end{aligned} \quad (1)$$

得到Stokes矢量后,可通过式(2)计算得到线偏振度和偏振角。

$$\begin{aligned} \text{DOLP} &= \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \\ \text{AOLP} &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

本文采用的探测器是国产自研的InGaAs近红外线列焦平面偏振探测器(0.9~1.7 μm),探测器包括红外像元和偏振像元,像元尺寸为30 μm×30 μm,探测器的排列结构如图2所示。探测器有270×4个像元,第一列和第四列为红外像元,第二列和第三列偏振像元。

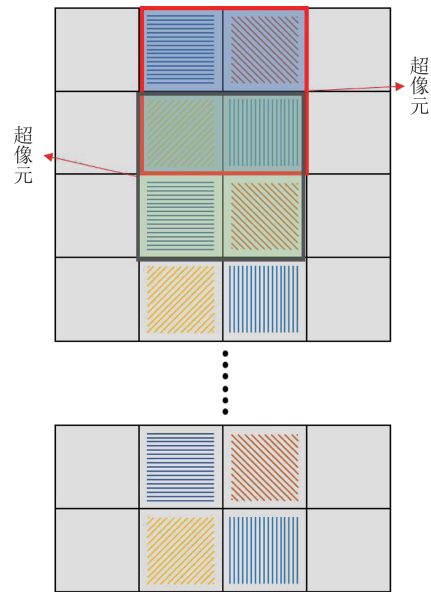


图2 探测器的结构

Fig. 2 Structure of the detector

由于微纳加工的工艺限制,在微偏振片阵列中,微偏振片的透射率、消光比和偏振角(微偏振片的偏振轴与参考方向的夹角)等存在一定的差异,影响了探测器的性能。为了降低因光衍射效应产生的像元串扰,偏振像元上集成的微偏振片并没有完全覆盖红外像元,微偏振片与红外像元的面积比为0.87:1,减弱了微偏振片的偏振调制效果。在不考虑像元间串扰的条件下,本文的校正方法可以消除微偏振片阵列引起的误差。

### 1.2 偏振像元响应模型

在偏振像元阵列中,入射辐射透过微偏振片,被焦平面上的像元吸收,如图3所示。探测器将接受的辐射进行光电转化,形成电信号,再通过A/D转换得到数字响应值。

对于单个偏振像元,其入射辐射用Stokes矢量 $S_{in}$ 表示,微偏振片的出射辐射强度 $L_{out}$ 的表达式如

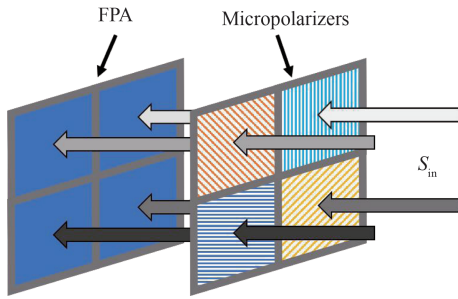


图3 入射辐射进入偏振像元示意图

Fig. 3 The incident radiation enters the polarization pixel diagram

式(3)所示。

$$L_{out} = \begin{bmatrix} \tau \\ \tau \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \cos(2\theta) \\ \tau \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \sin(2\theta) \end{bmatrix}^T S_{in} \quad , \quad (3)$$

式中 $\tau$ 为微偏振片的透射率, $\varepsilon$ 为消光比, $\theta$ 为偏振角。探测器的响应只与入射辐射强度相关,对辐射的偏振特性不敏感。探测器的响应与辐射强度的关系如式(4)所示。

$$I = gL_{out} + b \quad , \quad (4)$$

式中 $I$ 为探测器偏振像元的响应值, $g = \frac{Q_e A \Omega}{hv}$ 为像元的增益系数, $Q_e$ 为探测器的量子效率, $A$ 为探测器的接受面积, $\Omega$ 为单位立体角, $h$ 为普朗克常数, $v$ 为辐射频率, $b$ 为像元的偏置系数。将式(3)代入式(4)中,可以得到:

$$I = g \begin{bmatrix} \tau \\ \tau \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \cos(2\theta) \\ \tau \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \sin(2\theta) \end{bmatrix}^T S_{in} + b \quad , \quad (5)$$

在式(5)中,像元的增益系数与微偏振片的透射率同时作用于探测器的响应<sup>[13]</sup>,因此可以简单地认为是偏振像元的累积增益 $G$ (像元的增益系数和微偏振片透射率的乘积即 $G = g\tau$ )。令 $p = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \cos(2\theta)$ , $q = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \sin(2\theta)$ 则:

$$I = G \begin{bmatrix} 1 & p & q \end{bmatrix} S_{in} + b \quad , \quad (6)$$

通过以上分析可知,在不考虑像元串扰等因素的情况下,偏振像元的响应会受到微偏振片的透射率、消光比、偏振角以及像元的增益系数和偏置系数的影响。对于传统的成像系统,探测器的非均匀性只与像元的增益系数和偏置系数有关;而偏振成

像系统多了一个微偏振片阵列环节,在微偏振片阵列中,相同方向偏振轴的微偏振片因制造加工误差,导致微偏振片的透射率、消光比以及偏振角存在差异,进而使得偏振探测器的非均匀性问题更加严重。

## 2 偏振探测器的校正方法

偏振探测器定标和非均匀性校正的目的是:对于同一均匀的一强度入射辐射(无偏光),偏振探测器像元的响应一致;对于同一均匀的偏振入射辐射,探测器计算出来的偏振态是一致的<sup>[11]</sup>。在不同的积分时间或不同的入射辐射强度情况下,偏振探测器像元的增益系数和偏置系数是变化的,而微偏振片的透射率、消光比和偏振角等参数保持不变,因此偏振探测器的定标包括对偏振像元的累积增益 $G$ 、偏置系数 $b$ 的定标和微偏振片的消光比和偏振角等参数的定标,探测器的非均匀性校正分别为响应校正(探测器响应的非均匀性校正)和偏振校正(定标的微偏振片参数校正计算出入射偏振态)。

### 2.1 偏振探测器的定标和非均匀性校正

为了让偏振探测器的像元响应与接收到辐射强度成线性关系,需要先标定像元的累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ 。本文采用多点校正法标定了探测器累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ 。

定标采用高温黑体作为辐射源,黑体辐射可以视为均匀无偏光。将探测器正对着高温黑体,将黑体设置多个不同的温度,分别采集数据。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律如式(7)计算出不同温度下探测器响应波段的辐射出射度,采用多点校正法计算出探测器在不同的响应范围内的累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ 。

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1]} d\lambda \quad . \quad (7)$$

校正得到偏振探测器像元的累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ 后,令 $Y = \frac{(I - b)}{G}$ ,则有:

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & p & q \end{bmatrix} S_{in} \quad . \quad (8)$$

对于微偏振片阵列中的微偏振片,其参数是不变的,因此可以输入多组不同的偏振态辐射来计算微偏振片的参数,如式(9)所示。利用一个高消光比的偏振片放置在偏振探测器 and 高温黑体之间,保持黑体的温度不变,旋转偏振片的角度,得到多组不同的入射偏振态。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S^1_{in}]^T \\ [S^2_{in}]^T \\ \vdots \\ [S^N_{in}]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用最小二乘法进行拟合,可以得到微偏振的参数,如式(10)所示,式中+表示伪逆矩阵。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S^1_{in}]^T \\ [S^2_{in}]^T \\ \vdots \\ [S^N_{in}]^T \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于一个超像元,在不考虑瞬时视场误差(IF-OV)的情况下,则有:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_{45} \\ Y_{90} \\ Y_{135} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & p_0 & q_0 \\ 1 & p_{45} & q_{45} \\ 1 & p_{90} & q_{90} \\ 1 & p_{135} & q_{135} \end{bmatrix} S_{in} = AS_{in} \quad (11)$$

在式(11)中, $A \in R^{n \times 4}$ 表示超像元的4个相邻偏振片的偏振特性矩阵即超像元的分析矩阵, $Y_i (i=0, 45, 90, 135)$ 为超像元的响应值, $p_i$ 和 $q_i (i=0, 45, 90, 135)$ 为超像元4个相邻微偏振片的参数。

根据式(11),通过计算超像元的分析矩阵 $A$ 的伪逆矩阵,可以得到入射辐射的Stokes矢量 $S_{in}$ ,如式(12)所示,+表示伪逆矩阵。

$$S_{in} = A^+ Y = \begin{bmatrix} 1 & p_0 & q_0 \\ 1 & p_{45} & q_{45} \\ 1 & p_{90} & q_{90} \\ 1 & p_{135} & q_{135} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_{45} \\ Y_{90} \\ Y_{135} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于理想的焦平面偏振探测器,探测器的微偏振片参数和响应均是理想的,对于相同偏振角的偏振像元,其响应是一致的。校正后探测器像元的响应值 $Y_c$ 可以利用理想的超像元参数 $A_{ideal}$ 和 $S_{in}$ 计算得到,即超像元校正,如式(14)所示。

$$A_{ideal} = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Y_c = \begin{bmatrix} Y_{c0} \\ Y_{c45} \\ Y_{c90} \\ Y_{c135} \end{bmatrix} = A_{ideal} S_{in} \quad (14)$$

## 2.2 原始数据采集与校正流程

探测器校正装置如图4所示,包括高温黑体、可精确控制旋转角度精密转台、高消光比的金属线栅偏振片(Thorlabs公司提供的WP50L-UB,探测器响应波段的消光比>1000)、光学镜头和近红外线列偏振探测器。

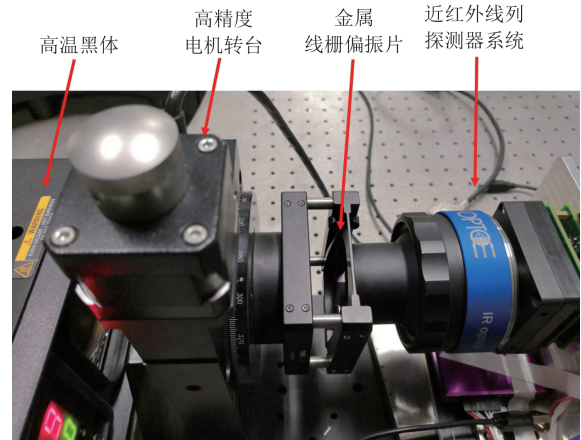


图4 校正装置图

Fig. 4 Correction device diagram

采集原始数据、处理数据和校正数据流程如下:

1) 将探测器正对着高温黑体(不经过偏振片),黑体设置成不同的温度(260~400℃,温度间隔为10℃),每个温度采集256次数据,数据深度为16位;

2) 为了降低探测器的随机噪声对定标参数的影响,将256次数据求平均,得到15组数据,根据式(7)计算出15个温度的辐射出射度。采用多点校正法计算出每个像元累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ ;

3) 将高温黑体的温度固定在380℃,偏振片固定在可精确控制旋转角度精密转台上,置于探测器和黑体之间。转台旋转5°采集一组数据(256次数据),将256次数据取平均,得到72组数据;

4) 步骤2)计算出的累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ 校正探测器采集的72组数据,偏振片可视为理想偏振片,计算出偏振片在不同角度时的入射Stokes矢量,再利用式(10)计算出每个像元的微偏振片参数;

5) 校正图像具体过程:对原始图像采用多点校正参数校正,除去每个像元的累积增益 $G$ 和偏置系数 $b$ ,再利用式(12)计算得到入射Stokes矢量估计;

6) 利用式(2)计算偏振度和偏振角。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验数据分析

探测器的响应曲线如图5所示。从图中可以看出探测器的响应值与入射辐射值并不完全呈线性关系,采用两点校正参数、多点校正参数和带有二次项的非线性校正参数进行拟合探测器的响应曲线,可以看出两点校正参数拟合的曲线误差最大,多点校正参数和带有二次项的非线性校正参数拟合的曲线误差较小。

为了评价不同拟合曲线的精度,采用平均误差(MAE)和均方误差(MSE)两种方法进行分析,MAE和MSE的计算公式如式(15)(16)所示。

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{1 \leq i \leq M} |O(i) - F(i)| \quad (15)$$

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{1 \leq i \leq M} (O(i) - F(i))^2 \quad (16)$$

式中  $M$  表示采集数据的组数,  $O(i)$  表示探测器的响应值,  $F(i)$  表示不同方法的拟合值。相对于原始数据,不同方法拟合曲线的 MAE 和 MSE 值如表 1 所示。从表中数据可以看出,多点校正参数拟合值的平均误差和均方误差值均明显小于非线性校正参数和两点校正参数的拟合值,因此探测器的响应校正应采用线性的多点校正法。

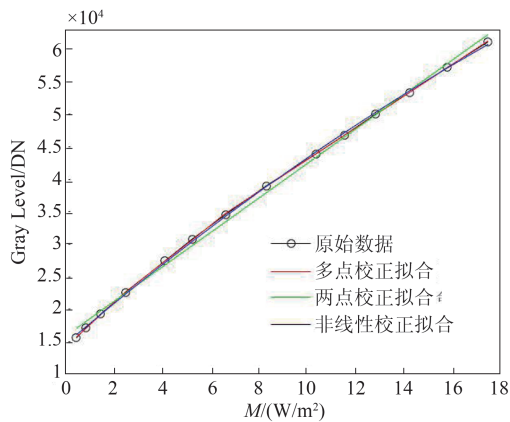


图5 探测器的响应曲线及不同方法的拟合曲线  
Fig. 5 Response curve of detector and fitting curve of different methods

在高温黑体温度为 380 °C 的条件下,探测器和黑体之间的偏振片处在不同角度,角度间隔为 5°,原始数据的四通道(超像元中四个不同角度的像元)响应如图6所示,可以看出探测器四通道的响应差异很大,存在严重的非均匀性;图7是探测器响应校正后的四通道响应,利用多点校正法校正原始数

表1 不同拟合曲线的MAE和MSE值

Table 1 MAE and MSE values of different fitting methods

|         | MAE      | MSE        |
|---------|----------|------------|
| 两点校正拟合  | 707.3213 | 6.7122E+05 |
| 多点校正拟合  | 91.8124  | 1.1236E+04 |
| 非线性校正拟合 | 259.7694 | 8.1304E+04 |

据,可以看出探测器四个通道的响应差异明显减小,但是峰谷和峰顶与探测器表面的微偏振片角度存在偏差;图8是在响应校正的基础上,利用超像元校正计算出的四通道响应,校正后的数据具有较好的均匀性,且校正了角度误差。

图9是探测器的响应校正和偏振校正后的偏振度值。在响应校正后,计算出的偏振度平均值为 44.6%,是理论值的 43.3%~46.6%,与实际值差别很大;偏振校正后,计算的偏振度值平均值为 100.0%,偏振度的值在 97.8%~101.5% 之间波动。

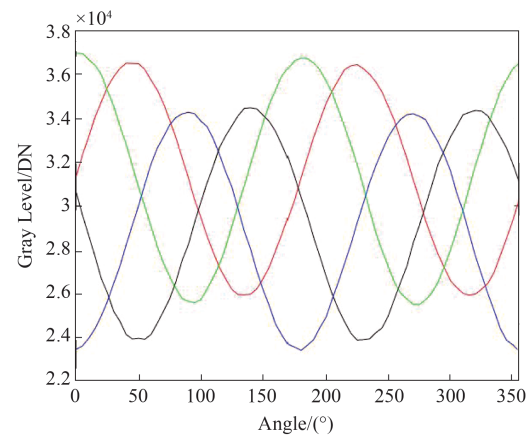


图6 原始数据四通道响应  
Fig. 6 Raw data four-channel response

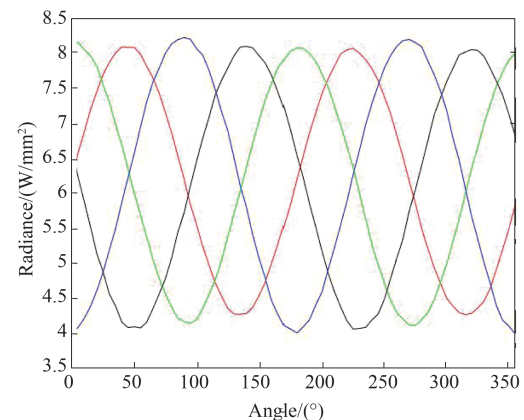


图7 响应校正后四通道响应  
Fig. 7 Four-channel response after non-uniform correction

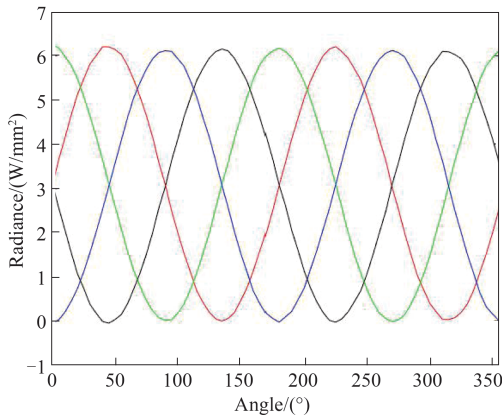


图8 超像元校正后四通道响应

Fig. 8 Four-channel response after super-pixel correction

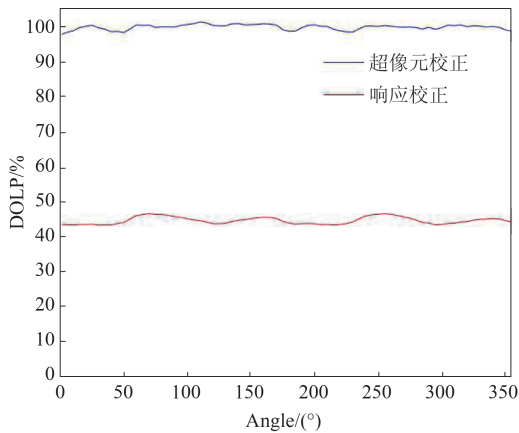


图9 校正前和校正后计算出的线偏振度

Fig. 9 DOLP calculated before and after calibration

为了验证校正的效果,定量评估校正模型<sup>[10]</sup>。在均匀的入射辐射条件下,改变偏振片的线偏振角,捕获原始偏振图像数据,计算强度图像和偏振度图像的均匀性。计算如式(17)所示。

$$NU = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{M - N_d} \sum_{k=1}^M [R(k) - \bar{R}]^2}, \quad (17)$$

式(17)中 $\bar{R}$ 表示图像的均值, $M$ 表示偏振像元的总数, $N_d$ 表示坏元和过热像元的数量, $NU$ 值越大表明图像不均匀性越严重,理想的 $NU$ 值为0。探测器的偏振强度图像和线偏振度图像的 $NU$ 计算结果如表2和表3所示。

表2 偏振强度图像的 $NU$ 值(%)Table 2  $NU$  value (%) of polarization intensity image

| 图像   | 10   | 130  | 160  | 190  | 1120 | 1150 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 未校正  | 3.09 | 2.61 | 2.20 | 2.23 | 2.67 | 3.09 |
| 响应校正 | 1.07 | 0.90 | 1.10 | 1.06 | 0.87 | 1.05 |
| 偏振校正 | 0.19 | 0.20 | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.19 |

表3 线偏振度图像的 $NU$ 值(%)Table 3  $NU$  value (%) of the linear polarization image

| 图像   | 10   | 130  | 160  | 190  | 1120 | 1150 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 未校正  | 14.9 | 15.0 | 11.6 | 10.4 | 15.1 | 14.6 |
| 响应校正 | 5.03 | 5.48 | 5.44 | 5.49 | 5.59 | 6.08 |
| 偏振校正 | 0.80 | 0.99 | 0.75 | 0.95 | 1.06 | 0.61 |

表2和表3列出了不同偏振态辐射下的强度图像和线偏振度图像的 $NU$ 值,表中的 $I_x(x=0, 30, 60, 90, 120, 150)$ 表示置于探测器前方偏振片角度为 $x$ ,线偏振度为1的偏振图像。

未校正的偏振强度图像 $NU$ 平均值为2.65%,线偏振度图像的 $NU$ 平均值为13.60%,表明图像存在严重的不均匀性;在响应校正后,偏振强度图像和线偏振度图像的 $NU$ 平均值分别为1.0083%和5.18%,图像不均匀性明显降低;偏振校正后,偏振强度图像和线偏振度图像的 $NU$ 平均值分别为0.17%和0.86%。

偏振校正后的偏振强度图像和线偏振度图像 $NU$ 平均值相对于响应校正后的图像分别降低了83.30%和83.40%,说明微偏振片参数对偏振图像非均匀有着严重的影响;相对于未校正的图像分别降低了93.64%和93.67%,因此本文校正方法可以明显降低偏振图像的非均匀性。

### 3.2 成像校正结果

将线列近红外偏振探测器固定在水平转台上,转台匀速旋转(推扫式)即可采集得到原始图像数据如图10(a)所示,图10(a)的图像包含偏振四个通道的数据,可以利用超像元计算图像的偏振信息。超像元计算图像的偏振信息会导致图像的行数减至为原始图像的一半,大大降低了图像的分辨率。为了不降低图像的分辨率,本文采用偏振像元复用的方式,如图2所示,第一行和第二行的偏振像元构成第一个超像元,而第二行和第三行的偏振像元可以构成第二个超像元,如此类推,计算得到偏振图像的行数不会减半,如图10(b)、(d)和(f)是强度图像 $S_0$ ,图10(c)、(e)和(g)是线偏振度图像DOLP。

图10(b)和(c)是未校正的原始数据利用式(1)和式(2)计算得到的偏振强度图像和线偏振度图像,可以看出强度图像和线偏振度图像均存在明显的横条纹,严重影响了图像的质量;图10(d)和(e)是响应校正后的图像,与未校正的图像相比,偏振强度图像和线偏振度图像均匀性得到了明显的改

善,图像质量有了显著地提升,但是线偏振度图像还是存在一定横条纹;图10(f)和(g)是校正微偏振片参数后得到的图像,偏振强度图像和线偏振度图像的均匀性得到了进一步的改善,无肉眼可见的横条纹,图像质量进一步改善。

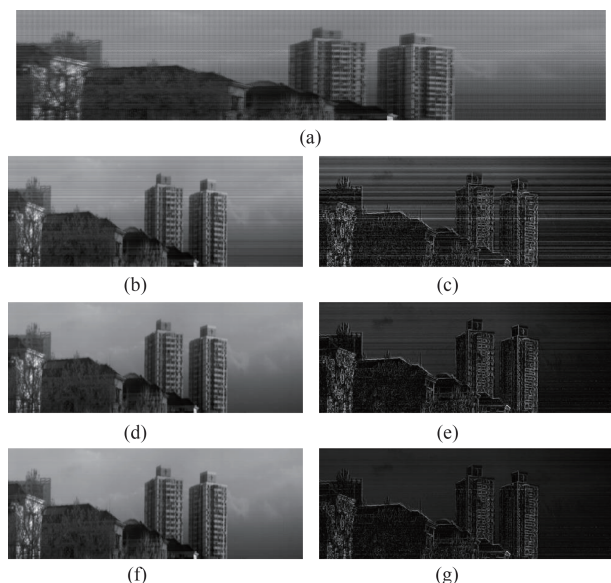


图10 实景图

Fig.10 Actual scene pictures

#### 4 结论

本文采用了国产自研的InGaAs近红外线列焦平面偏振探测器,针对探测器的特点,建立了探测器偏振像元的响应模型,根据响应模型采用多点校正法和带角度约束的最小二乘法分别标定了探测器的响应参数和微偏振片阵列参数,修正了探测器的响应非均匀性、微偏振片阵列透射率与消光比不均匀和微偏振片角度误差。利用探测器的定标参数计算得到的线偏振度值是真实线偏振度值的97.8%~101.5%,提高了探测器的偏振探测精度;同时校正了偏振强度图像和线偏振度图像的非均匀性,校正后的图像偏振强度图像和线偏振度图像的NU平均值分别为0.17%和0.86%,相对于未校正图像分别降低了93.64%和93.67%,对真实场景进行成像,图像质量得到了有效地提升。实验数据表明本文方法能够有效提高探测器的偏振探测精度,降低偏振图像的非均匀性,提升偏振成像质量。

#### References

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(22):5453-5469.
- [2] Meng L, Kerekes J P. An analytical model for optical polarimetric imaging systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(10):6615-6626.
- [3] Bostater C R, Mertikas S P, Neyt X, *et al.* Remote sensing of the ocean, sea ice, coastal waters, and large water regions 2016 - Infrared polarimetric sensing of oil on water [J]. *SPIE Proceedings*, 2016, **9999**:99990D.
- [4] Fang S, Xia X S, Huo X, *et al.* Image dehazing using polarization effects of objects and airlight [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(16):19523.
- [5] Qi J, Elson D S. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review [J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, **10**: 950-982.
- [6] Snik F, Craven-Jones J, Escuti M, *et al.* An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [7] WANG Xia, XIA Run-Qiu, JIN Wei-Qi, *et al.* Technology process of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展. *红外与激光工程*), 2014, **43**(10):3175-3182.
- [8] Powell S B, Gruev V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(18):21039.
- [9] Huang F, Fan-Ming L, Wei-Cong C, *et al.* Calibration method for division of focal plane polarimeters [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(18):4992-.
- [10] Feng B, Shi Z, Liu H, *et al.* Polarized-pixel performance model for DoFP polarimeter [J]. *Journal of Optics*, 2018, **20**(6):065703.
- [11] LIU Hai-Zhen, SHI Ze-Lin, FENG Bin. Mechanism and correction of infrared imaging non-uniformity in micro-polarizer arrays [J]. *Optics and Precision Engineering* (刘海峥, 史泽林, 冯斌. 微偏振片阵列红外成像非均匀性产生机理及其校正. *光学精密工程*) 2018, **26**(2): 480-491.
- [12] PENG Yong, FENG Bin, SHI Ze-lin, *et al.* Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters [J]. *Infrared and Laser Engineering* (彭勇, 冯斌, 史泽林, 等. 微偏振片阵列成像的非均匀校正研究. *红外与激光工程*), 2017, **46**(4):89-96.
- [13] Bowers, David L. Unpolarized calibration and nonuniformity correction for long-wave infrared microgrid imaging polarimeters [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(4): 046403.