微偏振片阵列成像的非均匀校正研究

彭 勇[1,2,3],冯 斌[1,2],史泽林[1,2],徐保树[1,2],惠 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:针对传统的非均匀校正算法难以校正偏振成像的非均匀问题,提出了一种新的矩阵校正算法。分析了偏振成像与非偏振成像的非均匀性的不同表现,阐述了微偏振片阵列成像的非均匀产生机理,指出了采用非偏振成像非均匀校正方法的失效原因。在构建偏振成像系统对入射偏振光源的响应模型基础上,提出了矩阵校正法。实验部分给出了矩阵校正法对均匀偏振场本底图像和信息丰富场景图像的校正效果,定量分析结果表明,矩阵校正法将均匀本底图像的非均匀性降至校正前的 10%左右。

关键词:微偏振片阵列; 偏振成像; 非均匀性校正

中图分类号:TN215 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.0404004

Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters

Peng Yong[1,2,3], Feng Bin[1,2], Shi Zelin[1,2], Xu Baoshu[1,2], Hui Bin[1,2]

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Traditional non-uniformity correction algorithm cannot correct the non-uniformity of polarization images, therefore a matrix correction algorithm was proposed. Firstly, the mechanism and imaging performance of non-uniformity in integrated microgrid polarimeters were presented. Then the difference of non-uniformity between the polarization image and traditional image was illustrated and the reasons for the failure of traditional methods were analyzed. By constructing a model of polarization imaging system in response to the incident polarized light source, the matrix correction algorithm was further proposed. After that, experiments gave the correction effects of polarization flatfiled images and scene images containing rich details. A quantitative analysis of experimental results proves that our matrix correction algorithm reduces the non-uniformity of flatfiled images to about 10%.

Key words: microgrid polarizer array(MPA); polarization imaging; non-uniformity correction(NUC)

收稿日期:2016-08-07; **修订日期**:2016-09-08

基金项目:中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-14-S116)

作者简介:彭勇(1991-),男,硕士生,主要从事偏振图像、红外图像非均匀性校正方面的研究。Email:py181135@163.com

导师简介:史泽林(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事光电成像、光电跟踪、图像处理、目标识别方面的研究。Email:zlshi@sia.cn

0 引 言

偏振成像信息被综合利用后，可以得到被观测目标的介电常数、复折射率、反射率、表面法线方向等信息。在工业检测、环境监测、医学诊断、海洋监测、大气遥感、仿生导航、天文观测、显微成像以及军事成像处理等方面[1-6]，偏振成像具有其他成像探测手段难以比拟的优势。

微偏振片阵列成像系统在理论上具有高透过率、高消光比、高实时性、高可靠性、低功耗等优点，不仅可以克服传统偏振成像系统的不足，还有望拓展偏振成像技术在高动态平台中的应用[7]。

微偏振片阵列成像系统由于探测器非均匀性及噪声，微偏振片的加工与安装误差降低了微偏振片阵列成像系统的探测精度[8-9]，因此需要对微偏振片阵列成像系统的非均匀性进行标定处理。

非偏振图像中的红外图像非均匀性校正的研究已有多年，出现了一些有效的校正方法[10]。但当直接把这些方法用在偏振图像的非均匀性校正上，效果是只能校正一种偏振度或者一个偏振方向的偏振图像，而对其他情况的偏振图像校正效果不佳，即非偏振图像的非均匀校正方法无法校正偏振图像的非均匀性。

文中在介绍焦面工程成像系统的成像原理、说明非均匀性的产生机理及成像表现之后，分析了偏振成像系统对入射偏振光源的响应模型，提出了一种矩阵校正法，并采用均匀辐射场和实拍外景图像进行校正效果测试。

1 微偏振片阵列成像系统

目前常用的偏振成像系统中，分时型偏振成像系统通过旋转探测器之前的偏振片来获得不同角度的强度图像来合成一幅偏振图像，牺牲时间来获取更多的信息[11]；分光型偏振系统是通过分光器使入射光束在多个不同角度的探测器上成像，然后再合成一幅偏振图像[12]；微偏振片阵列成像系统则是把微偏振阵列集成到探测器的焦平面上，使得相邻的像元能获得不同角度的偏振强度信息。分时型偏振成像系统不具有实时性，而且要求场景不能剧烈变化，因而实用性相对其他两类要低。

微偏振片阵列成像系统，又称分焦平面偏振计[11]、像素偏振片阵列[13]或微偏振片阵列等，是把微偏振片阵列直接集成到探测器的焦平面上，如图 1 所示。大部分的微偏振片阵列成像系统是做成测量线偏振斯托克斯矢量的，也有少部分做成测量全偏振斯托克斯矢量的[11]。图 1 显示的测量线偏振斯托克斯矢量的微偏振片阵列，此微偏振片阵列是由方向分别为 0°、45°、90°、135°的金属光栅交替排列形成的一整块偏振片，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}，这四个强度信息可用来估计斯托斯克矢量。

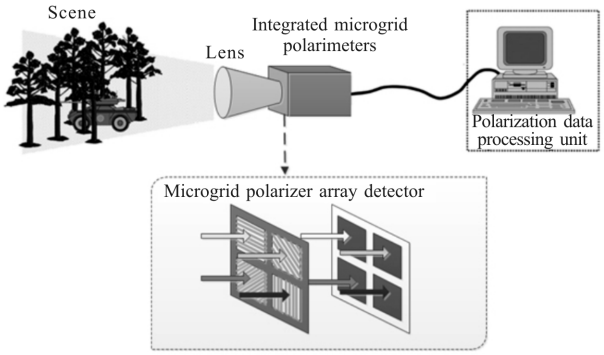


图 1 微偏振片阵列成像系统结构

Fig.1 Diagram of system structure of integrated microgrid polarimeters

偏振光一般用斯托克斯矢量来表征，因为斯托克斯矢量能表征所有类型的偏振光[14]，斯托克斯矢量 $S=[s_0\ s_1\ s_2\ s_3]^{\mathrm{T}}$，其中 s_0 表示总光强，s_1、s_2 共同表示偏振光中线偏振光分量，s_3 表示圆偏振光分量。由于在真实场景中，与线偏振光分量相比，圆偏振光分量占比非常小[15-16]，而且在工程中圆偏振光的测量相对不容易，所以工程中常采用简化的斯托克斯矢量[15]，取其前三个分量，且通过公式(1)来估计。

$$S=\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I_0+I_{90} \\ I_0-I_{90} \\ I_{45}-I_{135} \end{bmatrix} \tag{1}$$

获取斯托克斯矢量之后，可通过公式(2)求偏振图像的线偏振度。

$$\mathrm{DoLP}=\sqrt{\frac{s_1^2+s_2^2}{s_0^2}} \tag{2}$$

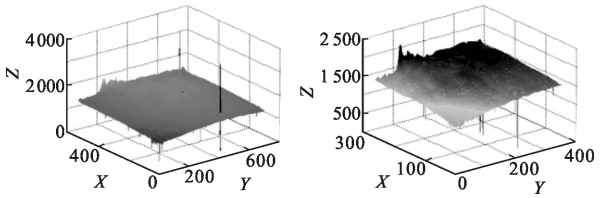
2 非均匀性的形成机理及表现

图像的非均匀性指的是相同亮度的光源入射，而读出的图像数据却不一致[17]。传统成像系统的每

个环节均有可能产生非均匀性，依次为光学系统的非均匀性、像元响应不一致的非均匀性、读出电路的非均匀性、信号放大器响应的非均匀性、A/D 转换产生的非均匀性[18]。传统图像的非均匀性主要来源于焦平面阵列的各像元响应不一致和读出电路的不一致。与传统成像系统相比，偏振成像系统多了一个微偏振片阵列环节，而且多组实验表明微偏振片阵列所形成的非均匀性比其他环节的非均匀性都要剧烈。

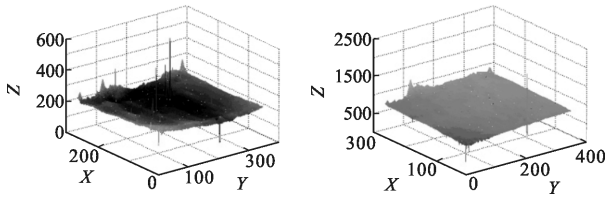
微偏振片阵列是微偏振片阵列成像系统完成偏振编码的关键器件。消光比和 TM 透过率是亚波长金属光栅偏振片的重要性能指标。在理想条件下，微偏振片的 TM 透过率为 100%，TE 透过率为 0。通常微偏振片阵列的制备工艺流程包括：蒸镀金属层、旋涂光刻胶、电子束曝光和显影、刻蚀金属层等多个复杂的工艺环节。在制备过程中，高精密加工设备的状态随时间发生微小随机波动等不稳定因素，最终造成微偏振片阵列存在加工误差。偏振光栅的结构参数(包括基底材料的折射率、金属光栅的复折射率系数、光栅的周期、占空比和高度)决定偏振光栅的偏振性能。微偏振片的加工误差，将影响其 TM 透过率和消光比[19]。此外，微偏振片阵列相对于探测器焦平面的安装误差，引起偏振探测器的相邻偏振单元间发生“串音”，从而降低偏振探测器的等效消光比。最终，微偏振片阵列的加工误差和安装误差共同作用，降低了微偏振片阵列成像系统的探测精度。

传统成像系统只获取强度信息，所以只要光源的强度相同，最后单个像元响应基本一致。偏振光源有不同偏振度和不同的偏振方向之分，偏振成像系统的单个像元对不同偏振度不同角度的偏振光响应都是不一致的。为了更加直观地观察非均匀性，在此引入响应值分布三维图(见图 2)，图中的 X 轴、Y 轴为探测器像元的行坐标和列坐标，Z 轴为像元的响应值。图 2(a)显示的是积分球形成的均匀自然光入射时获得的偏振图像的响应值分布三维图，理想情况



(a) 自然光
(a) Natural light

(b) I_0 分量
(b) I_0 component



(c) I_{90} 分量
(c) I_{90} component

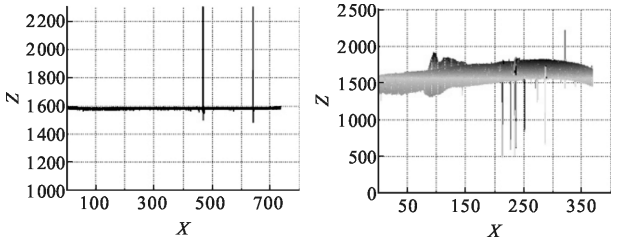
(d) I_{45} 分量
(d) I_{45} component

图 2 偏振图像的非均匀性

Fig.2 Non-uniformity of polarization image

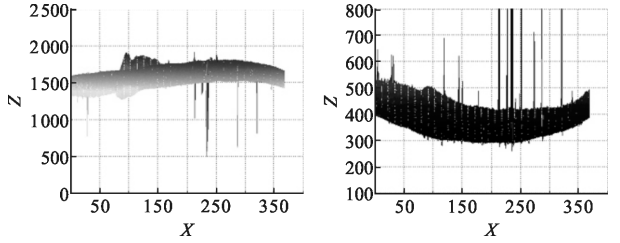
下本应是个平面，图 2(b)~(d)显示的是均匀的偏振度为 1、偏振方向为 0°的线偏振光入射时获得的偏振图像抽出不同角度后的图像的响应值分布三维图，从图中可以看出这四个图像都不是平面，且曲面弯曲的程度都各不相同，实验结果表明不同偏振度不同偏振方向的偏振光源所成图像曲面都不同。

因为上述特点，导致用传统图像的非均匀性校正方法去校正偏振图像时，往往只能校正好特定偏振度特定偏振方向的偏振图像，而对其他情况则校正不佳，从而致使这些方法在工程中无法应用。图 3 显示的用



(a) 校正自然光
(a) Correction of natural light

(b) 校正偏振方向为 0°的线偏振光
(b) Correction of linearly polarized light with 0° polarization direction



(c) 校正偏振方向为 45°的线偏振光
(c) Correction of linearly polarized light with 45° polarization direction

(d) 校正偏振方向为 90°的线偏振光
(d) Correction of linearly polarized light with 90° polarization direction

图 3 传统两点校正方法校正偏振图像的效果

Fig.3 Correction effects of polarization images using traditional two-point correction method

经典的两点校正算法对偏振图像校正后的图像的灰度分布三维图,为了显示效果,这里给出响应值分布三维图的侧视图以便观察是否校正成平面,两点校正所用的高低照度的本底分别为 100 lm 和 400 lm 的自然光本底, 被校正的是 200 lm 的自然光和线偏光本底, 此处采用不同的流明是为了调节探测器接收到的光源照度的大小。图 3(a)显示的是校正自然光本底的效果,从中可以看出校正效果非常好,因为校正系数就是从高低照度的自然光本底计算而来。图 3(b)~(d)显示的是校正线偏振光的效果,从中可以看出非均匀性并没有得到校正,效果很差。而且多组实验结果表明, 即使使用多组校正系数分别进行标定,校正效果都不是很好。

3 矩阵校正法

传统图像的非均匀性校正算法之所以校正不了偏振图像的非均匀性, 是因为偏振图像包含更多信息,不再只有传统图像的强度信息,偏振光源的变化因素更多, 一组或者多组增益和偏置系数不再能够完整地描述探测器对入射偏振光源的响应情况,所以直接沿用会导致校正效果很差。

图 4 显示的是偏振成像系统对入射偏振光源的响应模型,一般偏振器件的偏振性能是用米勒矩阵

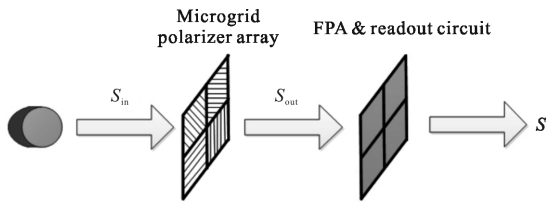


图 4 偏振成像系统的响应模型

Fig.4 Response model of polarization imaging system

M 来表征[14],如公式所示,偏振光源 S_{in} 经过偏振器件 M 之后变为 S_{out},充分说明了斯托克斯矢量各个分量之间的耦合关系,此处采用简化的斯托克斯矢量,取其前三个分量,则米勒矩阵也做如公式的相应简化。

$$S_{out}=M\cdot S_{in}=\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_{in_0} \\ s_{in_1} \\ s_{in_2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

而对于焦平面之后的探测器部分, 当探测器工作在线性区时,探测器对光源 S_{out} 的响应模型可沿用传统的线性响应模型[20],可由增益和偏置来表征,如公式(4)所示,其中 B 可认为是暗电流部分。

$$S=K\cdot S_{out}+B=\begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_{out_0} \\ s_{out_1} \\ s_{out_2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

偏振光源可以用斯托克斯矢量来表征, 而微偏振片阵列成像系统的输出也可以通过公式 (1) 获得测量到的偏振光的斯托克斯矢量,因此结合公式(3)和公式(4)可得出微偏振片阵列成像系统对入射偏振光源的响应如公式(5)所示,其中令 $A=K\cdot M$ 称为标定矩阵,令 $Y=S-B$,为记忆方便令 $X=S_{in}$。

$$\begin{aligned} S&=K\cdot M\cdot S_{in}+B \\ S-B&=A\cdot S_{in} \\ Y&=A\cdot X \end{aligned} \tag{5}$$

矩阵校正法的主要思想是通过采集多幅本底图像获取每个像元(i,j)的标定矩阵 A_{ij},然后用标定矩阵来标定探测器的响应图像, 从而对非均匀性进行校正。各个像元的标定矩阵可用均匀的偏振光源来进行求解,对于一个特定偏振度、偏振方向的均匀入射偏振光源 $X_i=[x_{0i}\ x_{1i}\ x_{2i}]^T$ 经过偏振成像系统后,单个像元可获得响应 $Y_i=[y_{0i}\ y_{1i}\ y_{2i}]^T$。由于标定矩阵 A 是 3×3 的矩阵,所以要想求出标定矩阵 A,至少需要 3 幅不同偏振度、偏振方向的偏振图像, 实际操作中, 可采集远多于 3 幅的偏振图像然后通过最小二乘来求出标定矩阵来减少测量误差。对于特定的 Y_i,可用整幅图像所有像元的斯托克斯矢量的平均值作为 Y_i 的理想输入 X_i。

矩阵校正法的一个较为完整的步骤可参考如下,以下是以单个像元(i,j)的校正过程为例说明,成像系统为可见光的微偏振片阵列成像系统:

(1) 获取暗电流部分 B

完全遮挡探测器的镜头采集数据, 获取的响应数据通过公式(1)计算斯托克斯矢量则可得到各个像元的暗电流部分 B。

(2) 获取自然光部分数据

用多组(设有 s 组)不同亮度的自然光即偏振度为 0 的均匀偏振光源照射探测器, 对获取的响应数据通过公式计算斯托克斯矢量, 然后减去暗电流部分,就可以得到各个像元的多组自然光部分数据$[Y_1\ \cdots\ Y_s]$,对每一组数据取所有像元斯托克斯矢量的均值作为理想输入,即可得到$[X_1\ \cdots\ X_s]$。

(3) 获取线偏振光部分数据

用多组(设有 t 组)不同亮度、偏振方向的线偏振光即偏振度为 1 的均匀偏振光源照射探测器，对获取的响应数据通过公式(1)计算斯托克斯矢量，然后减去暗电流部分，就可以得到各个像元的多组线偏振光部分数据 $[Y_{s+1}\ \cdots\ Y_{s+t}]$，对每一组数据取所有像元斯托克斯矢量的均值作为理想输入，即可得到$[X_{s+1}\ \cdots\ X_{s+t}]$。

(4) 计算出各个像元的标定矩阵

根据以上获得的数据则有

$$[Y_1\ \cdots\ Y_{s+t}]=A[X_1\ \cdots\ X_{s+t}]$$

$$Y=AX \tag{6}$$

要求 $s+t\geqslant 3$，则根据公式(7)可求出某个特定像元的标定矩阵，同理可求出每个像元的标定矩阵

$$A=YX^{-1} \tag{7}$$

(5) 用标定矩阵去校正偏振图像的非均匀性

获取标定矩阵 A 之后，可根据公式(8)求出像元(i,j)的理想输入，即校正非均匀性之后的响应，依此法求出其他所有像元的校正后的响应，即可得出校正后偏振图像。

$$A=A^{-1}Y \tag{8}$$

4 实验结果与分析

为了验证矩阵校正法的有效性，文中分别对本底图像和场景图像做了非均匀性校正实验。图 5 是成像系统采集数据时的光路图，积分球出来的是均匀的自然光，经过电控旋转偏振片之后成为均匀的线偏振光，然后再经过偏振成像系统形成偏振图像。

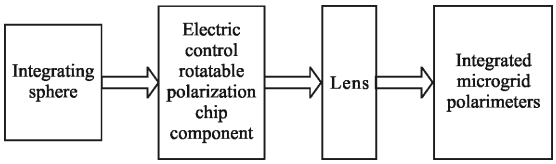
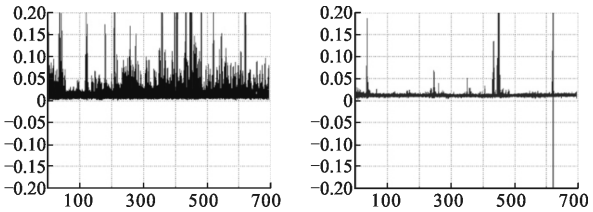


图 5 光路图

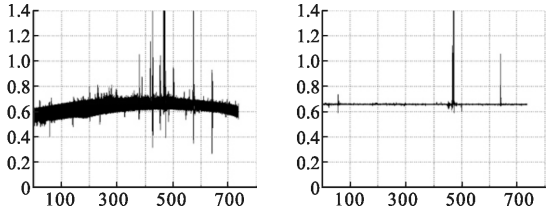
Fig.5 Optical path diagram

图 6 是矩阵校正法对本底图像的校正效果，图 6(a)、(b)是对 200 lm 自然光本底校正前后的偏振度分布三维图，偏振度是通过公式(2)计算而得的，为了方便观察效果，显示其侧视图，对比可发现，校正之后，除了极少数盲元[17]，大部分都校正得比较均匀。图 6(c)~(f)显示的是矩阵校正法对线偏光偏振方向分别为 45°、90°时的校正前后偏振度分布三维图，从中可以看出，除了少数盲元外，大部分都校正得非常均匀。



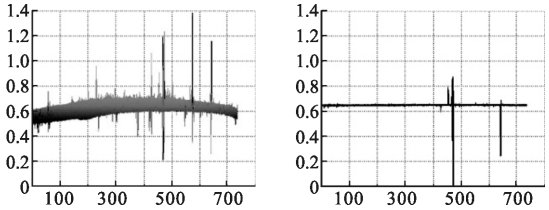
(a) 校正前自然光本底 (b) 校正后自然光本底

(a) Background of natural light before NUC (b) Background of natural light after NUC



(c) 校正前线偏光本底 1 (d) 校正后线偏光本底 1

(c) Background of linearly polarized light 1 before NUC (d) Background of linearly polarized light 1 after NUC



(e) 校正前线偏光本底 2 (f) 校正后线偏光本底 2

(e) Background of linearly polarized light 2 before NUC (f) Background of linearly polarized light 2 after NUC

图 6 矩阵校正法对本底图像的校正效果

Fig.6 Effects of matrix correction algorithm on background images

为了量化分析上述校正过程的效果，可借鉴传统图像非均匀性的概念对偏振度图像进行非均匀性度量[18]，偏振度图像的非均匀性的定义如公式(9)所示，其中 M、N 表明图像的规模为 M 行 N 列，$P(i,j)$ 为像元(i,j)的线偏振度，$\bar{P}$为整幅图像线偏振度的均值，d、h 是像元的盲元中死元和过亮元的数量。

$$\mathrm{NU}=\frac{1}{\bar{P}}\cdot\sqrt{\frac{1}{M\cdot N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[P(i,j)-\bar{P}]^2}\cdot 100\% \tag{9}$$

表 1 给出了多组本底图像校正前后非均匀性的量化情况,其中最后三行为自然光校正前后情况,由于其均值在 0 附近,表中显示的是其标准差。比较表中的第二列和第三列,可以看出,经过矩阵校正法校正后,偏振图像的非均匀性降到校正前的 10%左右。从表中可看出,经过矩阵校正法校正之后,非均匀性显著降低,算法起到了非均匀性校正的作用。

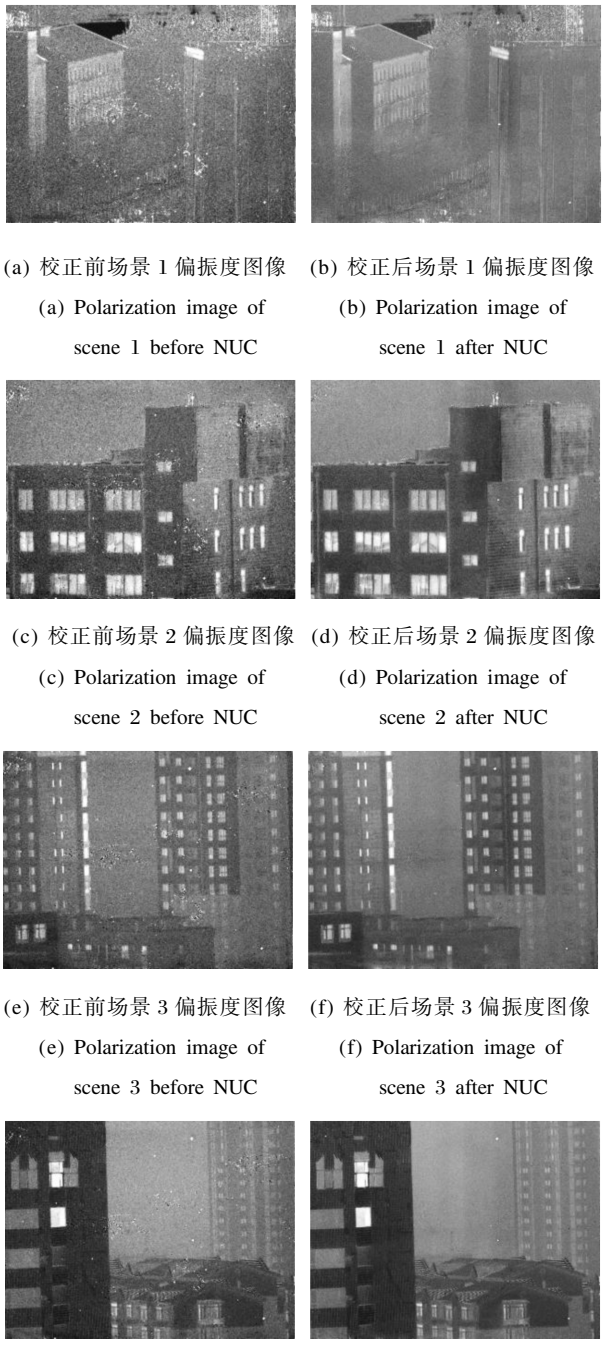
表 1 多组本底图像校正前后的非均匀性

Tab.1 NU of different background images before and after NUC

Image	NU before NUC	NU after NUC
I100_000	3.83%	0.32%
I100_045	4.01%	0.35%
I100_090	3.70%	0.33%
I100_135	3.92%	0.34%
I200_000	3.81%	0.30%
I200_045	3.99%	0.34%
I200_090	3.68%	0.32%
I200_135	3.91%	0.32%
I400_000	3.77%	0.25%
I400_045	3.90%	0.31%
I400_090	3.63%	0.26%
I400_135	3.77%	0.25%
d100	0.51%	0.19%
d200	0.52%	0.20%
d400	0.51%	0.17%

其中,*Ixxx_yyy* 中的 *xxx* 表示照度,*yyy* 表示电控旋转偏振片的旋转角度,即代表线偏振光的偏振方向;d*xxx* 中的 *xxx* 表示照度。

为了说明矩阵校正法在实际应用中的效果,也对场景偏振图像做了非均匀性校正工作。图 7 左边是不同场景的偏振度图像,图 7 右边是用矩阵校正法分别对不同场景校正之后的偏振度图像,校正前后对比可发现,矩阵校正法不仅去除了大量偏振度图像中的异常白点,还确实对图像中均匀的物体做了非均匀性校正,使其均匀化了,显著地降低了偏振图像的非均匀性。



(a) 校正前场景 1 偏振度图像 (a) Polarization image of scene 1 before NUC

(b) 校正后场景 1 偏振度图像 (b) Polarization image of scene 1 after NUC

(c) 校正前场景 2 偏振度图像 (c) Polarization image of scene 2 before NUC

(d) 校正后场景 2 偏振度图像 (d) Polarization image of scene 2 after NUC

(e) 校正前场景 3 偏振度图像 (e) Polarization image of scene 3 before NUC

(f) 校正后场景 3 偏振度图像 (f) Polarization image of scene 3 after NUC

(g) 校正前场景 4 偏振度图像 (g) Polarization image of scene 4 before NUC

(h) 校正后场景 4 偏振度图像 (h) Polarization image of scene 4 after NUC

图 7 矩阵校正法对场景偏振度图像的校正效果

Fig.7 Effects of matrix correction method on scene polarization images

5 结 论

文中对微偏振片阵列成像系统的非均匀性进行了研究,分析了非均匀性在成像系统各个环节的产

生机理，并给出了偏振图像非均匀性与传统图像非均匀性的不同和成像表现。在验证传统非均匀性校正算法对偏振图像非均匀性校正效果不佳之后，提出了一种矩阵校正法，并分析了微偏振片阵列成像系统对入射偏振光源的响应模型。随后给出了矩阵校正法对均匀本底图像和信息丰富的场景图像的校正效果，实验结果验证了矩阵校正法的有效性，矩阵校正法能显著降低偏振图像的非均匀性，能在实际应用中发挥作用。

参考文献：

[1] Guo Hong, Gu Xingfa, Xie Donghai, et al. A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing[J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2014, 34(7): 1873-1880. (in Chinese)
郭红, 顾行发, 谢东海, 等. 大气气溶胶偏振遥感研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1873-1880.

[2] Chen Xingfeng, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2011, 31(6): 1648-1653. (in Chinese)
陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1648-1653.

[3] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, et al. Analyzing of optical remote polarization imaging simulation based on intensity images and surface polarized bidirectional reflectance data[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2014, 34(10): 288-293. (in Chinese)
黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. 基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 288-293.

[4] Feng Bin, Shi Zelin, Ai Rui, et al. Computational model for polarization degree of airlight under condition of near-horizontal observation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(3): 704-712. (in Chinese)
冯斌, 史泽林, 艾锐, 等. 近水平观测条件下大气背景光偏振度的计算模型[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 704-712.

[5] Wang Lu, Wang Yinlong, Wang Zhiwen, et al. Bionic polarized light navigation sensor based on integrated photodetector[J]. ***Transducer and Microsystem Technologies***, 2016, 35(1): 91-94. (in Chinese)
王璐, 王寅龙, 王志文, 等. 基于集成光电探测器的仿生偏振光导航传感器[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(1): 91-94.

[6] Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, et al. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32(5): 20-24. (in Chinese)
张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 20-24.

[7] Zhao Yongqiang, Zhang Yuchen, Liu Wuteng, et al. Polarization imaging by micro-polarizer array [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(10): 3117-3123. (in Chinese)
赵永强, 张宇辰, 刘吾腾, 等. 基于微偏振片阵列的偏振成像技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3117-3123.

[8] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Cheng Teng, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry [J]. ***Review of Scientific Instruments***, 2014, 85(10): 105002.

[9] Brock N J, Crandall C, Millerd J E. Snap-shot imaging polarimeter: performance and applications[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9099: 909903.

[10] He Taicheng. The research for non-uniformity correction of infrared focal plane arrays [D]. Xi′an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
何泰诚. 红外焦平面非均匀性校正算法的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.

[11] 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.

[12] Yin Chengliang, Wang Feng, Yuan Hongwu, et al. Research on calibration of the dispersive polarization imaging detection system[J]. ***Optical Technique***, 2015, 41(1): 11-15. (in Chinese)
尹成亮, 王峰, 袁宏武, 等. 分光型偏振成像探测系统校正研究[J]. 光学技术, 2015, 41(1): 11-15.

[13] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, et al. Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement [J]. ***Acta Phys Sin***, 2014, 63(18): 232-241. (in Chinese)
张志刚，董凤良，张青川，等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 232-241.

[14] Schott John R. Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing [M]. Washington: SPIE Press, 2009: 33-48.

[15] Niu Jiyong. Research on the key technologies for access to infrared polarization characteristics of space targets [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese

Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
牛继勇. 空间目标红外偏振特性获取关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.

[16] Fetrow M P, Sposato S H, Bishop K P, et al. Spectral polarization signatures of materials in the LWIR [C]// Proceedings of SPIE, 2000, 4133: 249-260.

[17] GB/T 17444-2013. Measuring methods for parameters of infrared focal plane arrays [S]. Beijing: China Standards Press, 2013. (in Chinese)
GB/T 17444-2013. 红外焦平面阵列参数测试方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[18] Li Xiaoyang. Study on non-uniformity correction of infrared image based on computational intelligence algorithm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
李晓阳. 基于智能计算的红外图像非均匀性校正方法研究[D], 成都: 电子科技大学, 2013.

[19] Feng Bin, Shi Zelin, Xu Baoshu, et al. Performance characterization and design of wire grid polarizer applied to airlight rejection[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(12): 24-30. (in Chinese)
冯斌, 史泽林, 徐保树, 等. 面向大气背景光抑制的金属光栅偏振片效能表征及设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 24-30.

[20] Kong Peng, Hou Min, Luo Beibei, et al. Real-time non-uniformity correction algorithm for infrared search and track system[J]. ***Journal of Applied Optics***, 2014, 35(2): 327-331. (in Chinese)
孔鹏, 侯民, 罗蓓蓓, 等. 一种适用于红外搜索跟踪系统的实时非均匀性校正算法[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 327-331.