第 37 卷 第 11 期
2017 年 11 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 37, No. 11
November, 2017

像素刻划偏振相机的高精度像素级偏振非均匀性矫正

孙 翯，王德江*，马天翔，徐文畅，姚 园

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室，吉林 长春 130000

摘要 金属纳米线栅是像素刻划偏振相机的核心器件，线栅上刻划了与光电探测器像元一一对应的微偏振片阵列，该阵列具有较大的非均匀性，对成像质量有较大影响。基于此，根据纳米线栅的结构与偏振传输理论，建立纳米线栅像素级矢量传输矩阵的测量数学模型，并结合矩阵最小二乘法，推导出多次测量以拟合最优传输矩阵的方法，为偏振相机像素级非均匀性矫正提供了核心的矫正参数。然后，兼顾纳米线栅刻划方式，提出了高空间分辨率的矫正算法。通过矫正后，偏振相机非均匀性由原来的 2.00%降低至 0.26%。外景成像实验中，目标偏振度图像的信息熵由 5.34 提升至 15.15。结果表明，所提算法可以有效矫正纳米线栅的非均匀性，提升了偏振图像质量。

关键词 成像系统；偏振相机；偏振成像；偏振非均匀性；矢量传输测距测量；纳米线栅

中图分类号 O435 **文献标识码** A

doi：10.3788/AOS201737.1111002

High Precision Pixel Level Non-Uniformity Calibration of Pixelated Polarization Camera

Sun He, Wang Dejiang, Ma Tianxiang, Xu Wenchang, Yao Yuan

Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun Jilin, 130000, *China*

Abstract The metalnano wire grating is the core component of pixelated polarizing camera, and the micro-polarizer array engraved on the wire grating is one to one correspondence with the photodetector. This micro-polarizer array has high non-uniformity and large influence on image quality. Aiming at this problem, we improve the mathematic model of pixel-level vector transfer matrix measurement algorithm based on the structure of the nano wire grating and the polarization transfer theory. Combined with the matrix least squares algorithm, a number of measurements are established to fit the optimal transfer matrix algorithm, and then the core calibration parameters are provided for pixel-level non-uniform calibration of the polarization camera. Considering the structure of the nano wire grating, a calibration algorithm with high spatial resolution is proposed. The non-uniformity of polarization camera decreases from 2.00% to 0.26% after calibration. On the outfield experiment, the information entropy of the target polarization image rises from 5.34 to 15.15. The results show that the proposed algorithm can effectively correct the non-uniformity of the nano wire grating and improve the quality of polarization image.

Key words imaging systems; polarizing camera; polarization imaging; polarization uniformity; measurement of vector transfer matrix; nano wires

OCIS codes 110.5405; 120.5410; 260.5430

1 引 言

基于像素刻划的线偏振成像相机在探测器前微米级的距离上集成了金属纳米线栅，线栅上刻划了不同偏振相位的像素级微偏振片阵列。利用分焦平面的原理，同时测量目标光在 4 个不同线偏振相位的强度，通过解算，可同时实现光强度、光线偏振度、光线偏振相角信息的成像[1]。这种结构方式对震动温度不敏感，体积小、功耗低、环境可靠性高，适用于复杂机载环境下的动态目标监测，目前已广泛应用于显微、大气监测和

收稿日期：2017-05-17；**收到修改稿日期**：2017-06-05

基金项目：国家自然科学基金(61675202)、中国科学院基金(CXJJ-16S038，CXJJ-17S017)

作者简介：孙 翯(1989—)，女，博士研究生，助理研究员，主要从事偏振成像方面的研究。

E-mail：sunhe_ciomp@163.com

*通信联系人。E-mail：wangdejiang@ciomp.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

航空遥感等领域[2]。由于刻蚀工艺的限制，金属纳米线栅的周期、宽度与深度存在约为20%的偏差[3]。这将造成偏振片阵列的参数如透过率、消光比等具有较大的非均匀性，从而导致偏振图像信息熵的降低。因此，矫正金属纳米线栅的非均匀性成为提高像素刻划偏振相机成像质量的关键[4]。目前，国内在像素刻划偏振成像领域尚处于探索阶段，对相机非均匀性矫正的研究鲜有报道。

本文提出了一种像素刻划偏振相机的高精度像素级偏振非均匀性矫正方法。首先根据纳米线栅的结构，以像元组为单位，结合偏振光传输理论，建立了测量纳米线栅像元组矢量传输矩阵的数学模型。为提高测量精度，应用最小二乘法，推导出多次测量拟合像元组矢量传输矩阵的方法，得到非均匀矫正的核心参数；然后针对像素刻划偏振相机损失空间分辨率的特点，提出像素级矫正算法。使用搭建的实验装置与算法拟合出相机所有像元组矢量传输矩阵参数，运用像素级矫正算法，可以明显提升图像质量。

2　像素刻划偏振相机结构

像素刻划偏振相机的偏振成像器件结构如图1所示，由光电探测器及集成于探测器前微米级距离的金属纳米线栅组成，线栅上的每个微偏振片与光电探测器的像元一一对应。该线栅以相邻的4个微偏振片为一组，构成微偏振片像元组，重复刻划4种不同偏振相位的像素级微偏振片[5]。

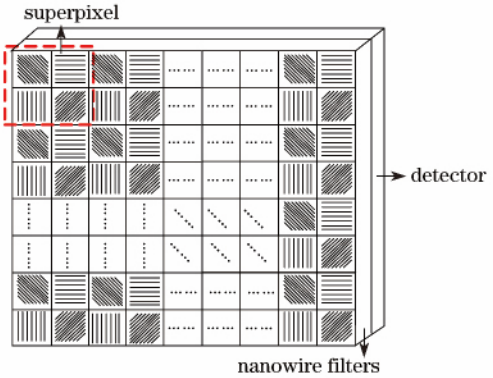

图1　像素刻划纳米光栅示意图

Fig. 1　Schematic of nanowire polarization filters

由于刻蚀工艺的限制，线栅上像元组间的消光比、透过率等参数区别较大，影响偏振成像质量，而通过提高刻蚀工艺的方法降低线栅非均匀性代价昂贵。因此在相机成像后，使用算法对线栅非均匀性进行矫正。

3　像素刻划偏振相机的高精度像素级偏振非均匀性矫正

3.1　金属纳米线栅矢量传输矩阵测量方法

矫正纳米线栅非均匀性最直接的方法为：测量出靶面上每个像元组的矢量传输矩阵，再由矢量传输矩阵反向解算出实际入射光的光矢量[6]。因此，测量出偏振相机像素级矢量传输矩阵参数是高精度非均匀性矫正的关键。矢量传输矩阵的测量系统如图2所示，该系统由光源、定标单元、被测对象与探测器组成。光源发出的光经过定标单元与被测对象被光电探测器接收，最后输出量化的光强值。

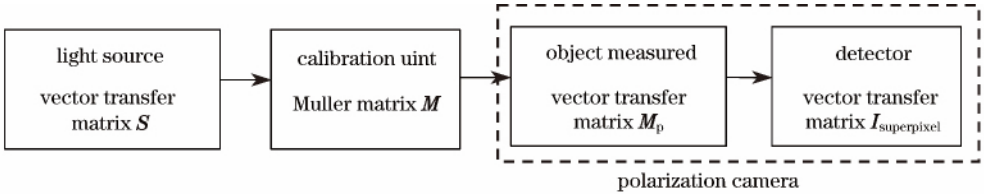

图2　线栅矢量传输矩阵测量系统

Fig. 2　Measurement system of polarization filters vector transfer matrix

光源为积分球输出的均匀无偏光。定标单元为高精度的线偏振器件，无偏光通过该器件，能够产生可控、可计算的高精度线偏振光。被测对象为金属纳米线栅。探测器即为置于金属纳米线栅后端的光电

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

探测器。

光源输出光的斯托克斯矢量为 $\boldsymbol{S}=\{S_{0\mathrm{ing}},0,0,0\}$，$S_{0\mathrm{ing}}$ 表示积分球的光强。

高精度线偏振片的穆勒矩阵为

$$\boldsymbol{M}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & \frac{\varepsilon-\eta}{\varepsilon+\eta}\cos2\alpha & \frac{\varepsilon-\eta}{\varepsilon+\eta}\sin2\alpha & 0\\ \frac{\varepsilon-\eta}{\varepsilon+\eta}\cos2\alpha & \cos^2 2\alpha+2\sqrt{\varepsilon\eta}\sin^2 2\alpha & (1-2\sqrt{\varepsilon\eta})\sin2\alpha\cos2\alpha & 0\\ \frac{\varepsilon-\eta}{\varepsilon+\eta}\sin2\alpha & (1-2\sqrt{\varepsilon\eta})\sin2\alpha\cos2\alpha & \sin^2 2\alpha+2\sqrt{\varepsilon\eta}\cos^2 2\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\tag{1}$$

式中 ε 为偏振片透光轴透过率，η 为阻光轴透过率，α 为偏振片的透光轴角度，实验中所选用的偏振片透过率大于 80%，消光比大于 1000∶1，有 $\frac{\varepsilon-\eta}{\varepsilon+\eta}\approx1$、$\varepsilon\eta\ll0.1$，可将(1)式简化为

$$\boldsymbol{M}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & \cos2\alpha & \sin2\alpha & 0\\ \cos2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin2\alpha\cos2\alpha & 0\\ \sin2\alpha & \sin2\alpha\cos2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\tag{2}$$

则可以计算出光源经过定标单元后出射光的斯托克斯矢量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{M}\star\boldsymbol{S}$。

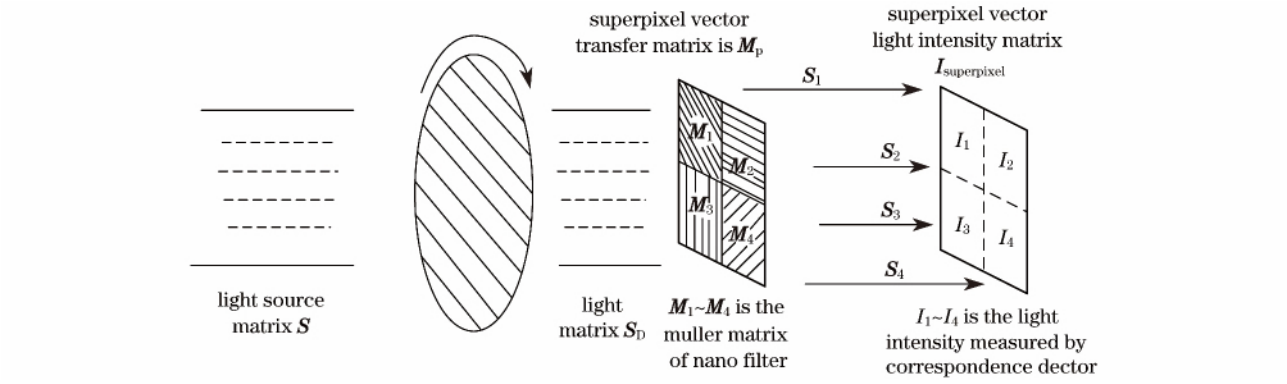

图 3　像元组光矢量传输示意图

Fig. 3　Schematic of optical path of superpixel

以金属纳米线栅上任意一个像元组为例(图 3)，当定标单元出射光 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}$ 经过像元组内第一个像元(偏振相角为 135°)后，得到 $\boldsymbol{S}_1=\boldsymbol{M}_1\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}=\{\boldsymbol{S}_{01},\boldsymbol{S}_{11},\boldsymbol{S}_{21},\boldsymbol{S}_{31}\}$。其中，$\boldsymbol{M}_1$ 为第一个像元对应微偏振片的穆勒矩阵。位于该微偏振片后的第一个像元接收到光强 $\boldsymbol{I}_1$，仅由 $\boldsymbol{S}_1$ 中的光强项即 $\boldsymbol{S}_{01}$ 决定，因此可推导出：

$$\boldsymbol{I}_1=\boldsymbol{S}_{01}=\boldsymbol{M}_1^1\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}},\tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{M}_1^1$ 为微偏振片穆勒矩阵 $\boldsymbol{M}_1$ 的第一行。把像元组中 4 个像元接收到的光强度矢量设为 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}}=\{I_1,I_2,I_3,I_4\}$。其中，$I_1$ 为定标单元出射光 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}$ 经过线栅上第一个微偏振片后，由对应光电探测器像元量化出的光强值，其他符号依次类推。则像元组的光强矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}}$ 可表示成 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}$ 与纳米线栅像元组矢量传输矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}$ 相乘的关系：

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}。\tag{4}$$

根据(3)式与(4)式可得，每个像元组的矢量传输矩阵由像元组中每个微偏振片穆勒矩阵的第一行组成，表示为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_1^1\\ \boldsymbol{M}_2^1\\ \boldsymbol{M}_3^1\\ \boldsymbol{M}_4^1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{p_1+q_1}{2} & \frac{p_1-q_1}{2}\cos2\theta_1 & \frac{p_1-q_1}{2}\sin2\theta_1 & 0\\ \frac{p_2+q_2}{2} & \frac{p_2-q_2}{2}\cos2\theta_2 & \frac{p_2-q_2}{2}\sin2\theta_2 & 0\\ \frac{p_3+q_3}{2} & \frac{p_3-q_3}{2}\cos2\theta_3 & \frac{p_3-q_3}{2}\sin2\theta_3 & 0\\ \frac{p_4+q_4}{2} & \frac{p_4-q_4}{2}\cos2\theta_4 & \frac{p_4-q_4}{2}\sin2\theta_4 & 0\end{bmatrix},\tag{5}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中 p_1 为第一像元的透光轴透过率，q_1 为第一个像元阻光轴的透过率，θ_1 为第一个像元的微偏振片角度，其他符号与此类似。与传统偏振片不同的是，纳米线栅中的微偏振片阵列的消光比仅约为 30，且透过率仅约为 0.7[7]，因此不能进行约简。纳米线栅的非均匀性主要体现在像元组与像元组之间，即矢量传输矩阵中透光轴透过率与阻光轴透过率的不同。因此，测量出每个像元组的矢量传输矩阵参数，即可矫正纳米线栅的非均匀性。

(4)式中，定标单元出射光 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}$ 为精确可算可控已知量，探测器光强组矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}}$ 也为已知量，理论上进行 4 次实验，即可求出金属纳米线栅上每个像元组的矢量传输矩阵的所有参数。但实际实验过程中，考虑光学器件的装配误差、相机响应非线性、高精度线偏振片不理想等情况，通过多次测量逼近实际矢量传输矩阵的方案精度更高。

采用基本的线性多次测量逼近法—矩阵最小二乘法。设矩阵方程 $\boldsymbol{l}=\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{v}$，其中使噪声 $\boldsymbol{v}$ 最小时的 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 取值应为 $(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{l}$。对应上述方程，结合矩阵变换方法，此处的仪器矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{T}}$ 可看作是原方程的未知数 $\hat{\boldsymbol{X}}$，$\boldsymbol{l}$ 对应于 N 次实验的探测器像元组的光强矩阵 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{caex}}^{\mathrm{T}}$，系数矩阵 $\boldsymbol{B}$ 对应 N 次实验得到的定标单元输出光的斯托克斯矢量矩阵 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{Dex}}^{\mathrm{T}}$，则根据矩阵最小二乘法理论可得：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{caex}}\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{Dex}}^{\mathrm{T}}\star\mathrm{pin}\ \boldsymbol{v}(\boldsymbol{S}_{\mathrm{Dex}}\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{Dex}}^{\mathrm{T}})。\tag{6}$$

根据(6)式，可多次拟合出每个像元组最佳的矢量矩阵参数，为偏振相机的高精度非均匀性校正提供核心的矫正参数。

3.2　偏振相机像素级高空间分辨率矫正算法

得到偏振相机的像素级矢量传输矩阵参数后，对偏振相机的每个大像元组进行矫正，求出靶面上所有像元组的实际入射光矢量为

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}_i}=\mathrm{pin}\ \boldsymbol{v}(\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}_i})\star\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}_i}。\tag{7}$$

式中 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}_i}$ 为该像元组的偏振相机的矢量传输矩阵，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}_i}$ 为相机量化的光强矩阵，pin $\boldsymbol{v}$ 为 $\boldsymbol{v}$ 的伪逆运算。

但光矢量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}_i}$ 仅表示整个像元组接收到的光强信息，不能表示像元组内像素与像素的区别，从而损失了空间分辨率[8]。因此，提出理想矢量传输矩阵 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{ideal}}$，假设探测器前的金属纳米线栅的消光比无穷大，透过率为 1，绝对均匀。每个像元组内的角度分布如图 2 所示，起始角度为 135°，对角间隔 90°。其矢量传输矩阵可由(5)式计算，结果表示为

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{ideal}}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1&1&0&0\\1&0&1&0\\1&-1&0&0\\1&0&-1&0\end{bmatrix}。\tag{8}$$

每个像元组内各个像元接收到的光强可表示为

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{ideal}}=\begin{bmatrix}I_{\mathrm{ideal}_1_i}\\I_{\mathrm{ideal}_2_i}\\I_{\mathrm{ideal}_3_i}\\I_{\mathrm{ideal}_4_i}\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{ideal}}\star\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}_i}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{ideal}}\star\mathrm{pin}\ \boldsymbol{v}(\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}_i})\star\boldsymbol{I}_{\mathrm{superpixel}_i}。\tag{9}$$

式中 $I_{\mathrm{ideal}_1_i}$ 表示纳米线栅为理想时，某像元组内第一像元接收到的光强值，其他符号可依次类推。所提出的高空间分辨率矫正算法的目标是得出每个像元组的理想光强矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{ideal}}$，该矩阵结合后期的插值图像处理算法即可得到高空间分辨率的强度、偏振度、偏振相角图像[9-11]，由于篇幅原因，在此不赘述。

4　实验结果与分析

基于上文所述的矢量传输矩阵测量模型，搭建如图 4 所示的实验光学系统，测量出偏振相机每个像元组的矢量传输矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}$。系统主要由积分球、可精确控制旋转角度的精密空心转台、高性能线偏振片、滤光片、平行光管及偏振相机组成。测量对象为不带光学镜头的基于纳米线栅的线偏振相机。实验中采用出光口径为 300 mm，直径为 1.5 m 的积分球，均匀性大于 99%，平行光管焦距选择 550 mm，平行光管的光阑口径

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

15 mm，视场角小于 1.67°。

精密旋转台重复角定位精度为 5′，由得地伟业生产。标准线偏振片放置于空心精密旋转台内部(LPVIS0200，Thorlab，美国)，该偏振片的口径为 50.8mm，透过率大于 0.8，消光比优于 1000，工作波段为 450～700 nm。偏振片后端放置透过波段为 450～700 nm 的滤光片，截止波段为 1200 nm，口径为50.8 mm。像素刻划相机选用 4D Technology 公司的 polarCam。整套系统置于光学平台上(图 4)，由上位机控制精密旋转台旋转的角度，当旋转台保持稳定时，上位机采集相机的 12 bits 原始图像数据。

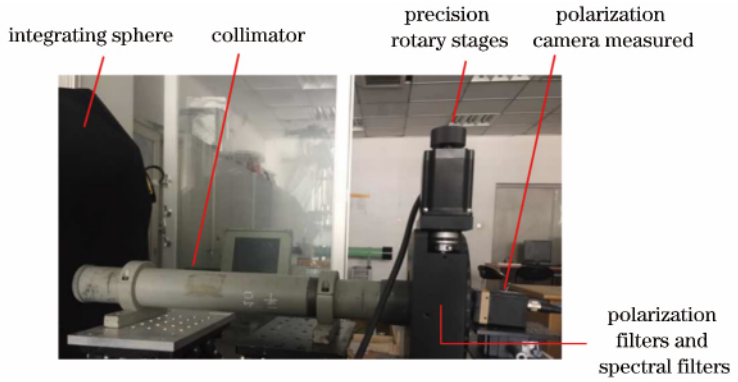

图 4　偏振相机矢量传输矩阵测量实验系统

Fig. 4　Measurement system of polarization camera vector transfer matrix

测量过程中，每隔 10°旋转线偏振片，每次采集偏振相机输出的强度图像 100 张，旋转 36 次，共采集 3600 张图片。数据处理时，为排除散粒噪声对均匀性量化的影响，把实验结果按照图片为单位进行组内平均计算。而后，每隔 180°的两组实验数据作平均[12]，平均后的图片以像元组为单位，直接计算出图像的偏振度。计算出 18 组图片所有像元组偏振度中位数及四分位数后，可绘制出 18 组实验数据的箱形图，如图 5 所示。

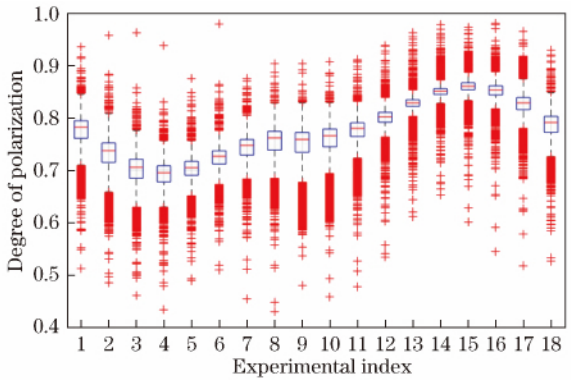

图 5　18 组原始数据的箱图

Fig. 5　Boxplot of 18 sets original data

图 5 中，每个纵列为一组实验图像数据的统计表示，中心的红线表示图像数据的均值，蓝框表示图像数据的 1/4 分位点，虚线的上下顶点为 3/4 分位点，也可称为统计数据的上下界，其他红十字为异常值。由图 5 可知，未校正前，完全偏振光照射下，偏振相机的平均偏振度值仅约为 0.7，且当光源的相角变化时，图像的偏振度浮动约为 0.17。每组实验的上下四分位数相差普遍超过 0.03，上下界相差 0.15，异常值较多。

得出 18 组实验数据后，应用文中数学模型，对相机所有像元组的矢量传输矩阵组进行计算，而后采用高精度像素级矫正算法对偏振相机进行矫正。

为验证本文算法，将偏振片旋转至 185°，而后每隔 10°采集 1800 张实验图片，做组内平均，再根据矢量传输矩阵矫正系数进行矫正，得到矫正后的 18 张图片。求出图片偏振度的中位数与四分位点后绘制出 18 组数据的箱形图，如图 6 所示。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

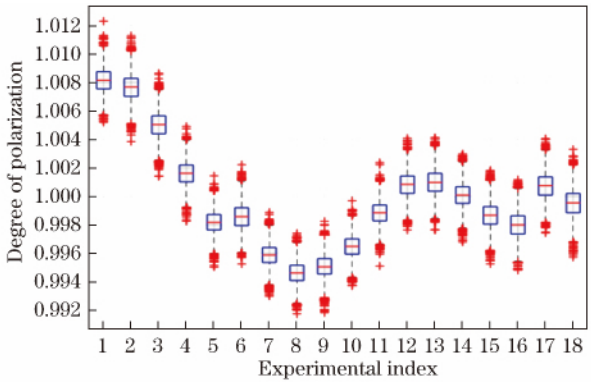

图 6　18 组矫正后的数据箱图

Fig. 6　Boxplot of 18 set data after calibration

由图 6 可知，校正后，图像的平均偏振度约为 1，但偏振度值仍会随着偏振光的相角不同，浮动约为0.02。上下四分位数相差普遍约小于 0.002，上下界相差约为 0.005，且异常值较少。两次实验数据的方差对比如图 7 所示。

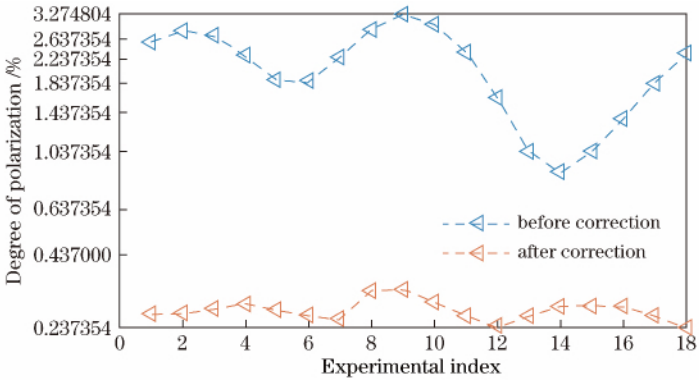

图 7　矫正前后实验数据方差对比图

Fig. 7　Variance of experimental data before and after calibration

方差是衡量图片非均匀性的重要指标，由图 7 可知，矫正前实验图片的方差约为 2%，校正后约为 0.26%，非均匀性下降 20%。

5　成像实验

使用偏振相机进行外场实验，图像拍摄于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研发大厦 12 楼，拍摄目标为长光奥普公司，对一个场景只进行一次拍摄。拍摄时的入射余角为 30°，斜距为 450 m。未经矫正的原始图像采用三次样条插值[13]后获得的偏振度与偏振相角图像如图 8 所示。

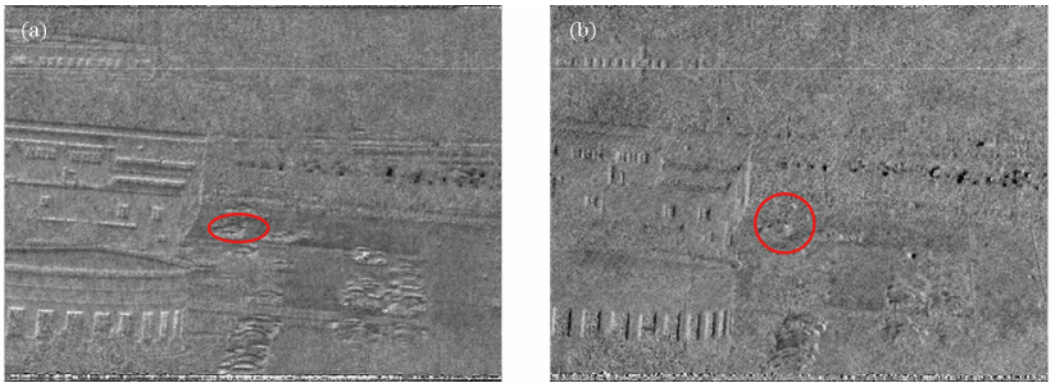

图 8　未经矫正的(a)偏振度与(b)偏振相角图像

Fig. 8　(a) Degree of polarization and (b) angle of polarization pictures before calibration

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用计算得出的矫正系数对图像进行像素级矫正后，再把图像进行三次样条插值，所获得的偏振度和偏振相角图像如图 9 所示。

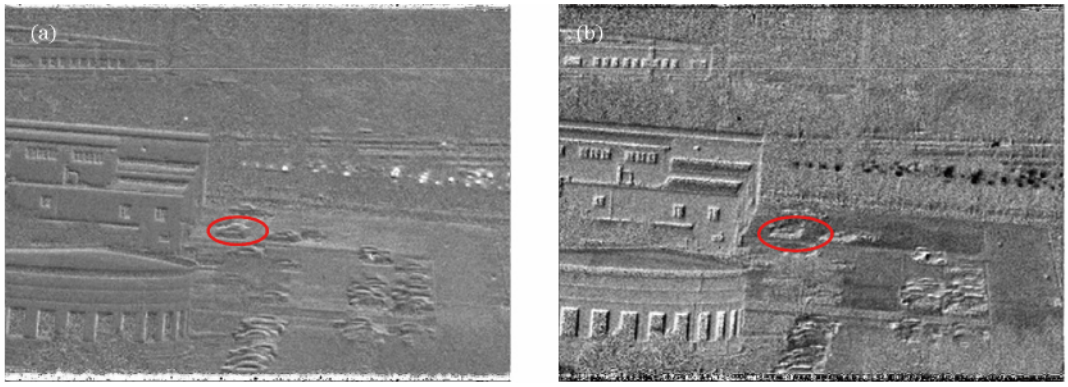

图 9　矫正后的(a)偏振度与(b)偏振相角图像

Fig. 9　(a) Degree of polarization and (b) angle of polarization pictures after calibration

由图 9 可知，未经矫正的偏振度和偏振相角图像噪声较大，且边缘表现不明显，而经过矫正的图像整体噪声明显减少且边缘表现更为明显。

取图 9 中红色区域计算目标平均灰度信息熵如表 1 所示，校正后的图像目标与背景信息熵提高了 3 倍。

表 1　信息熵统计值

Table 1　Statistical value of information entropy

Item	Before calibration	After calibration
Degree of polarization	5.34	17.34
Angle of polarization	3.25	15.15

综上所述，本文矫正算法减小了偏振图像的噪声，同时提高了图像对比度，增强了图像的边缘信息。

5　结　　论

像素刻划偏振相机已应用于航空偏振成像领域，其核心器件金属纳米线栅，具有较强的非均匀性。使用高精度像素级偏振非均匀性矫正方法，经实际成像距离为 450 m 的外场实验证实，可使目标信息熵提高 3 倍。实验室测试时，虽保持光源偏振度不变，但矫正后的偏振度值仍会随着光源偏振相角的不同而出现差别，这也会影响偏振相机的成像质量，成为后续的研究重点。

参　考　文　献

[1] 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.

[2] Myhre G, Hsu W, Peinado A, *et al*. Liquid crystal polymer full-Stokes division of focal plane polarimeter[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27393-27409.

[3] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, *et al*. Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 184204.
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)：184204.

[4] Powell S B, Gruev V. Calibration methods for divisionof-focal-plane polarimeters[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21039-21055.

[5] Gruev V, Perkins R, York T. Material detection with a CCD polarization imager[C]. Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2010: 1-7.

[6] Chen Ligang. Polarimetric calibration of the polarization CCD camera with large viewing field[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(2): 15-20.
陈立刚. 大视场偏振 CCD 相机的偏振特性实验标定[J]. 光电工程，2015，42(2)：15-20.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] Gruev V, Perkins R, York T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 19087-19094.

[8] LaCasse C F, Chipman R A. Band limited data reconstruction in modulated polarimeters[J]. Optics Express, 2011, 19(16): 14976-14989.

[9] Kimbrough B T. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors[J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4554-4562.

[10] Kullkarni M, Gruev V. Integrated spectral-polarization imaging sensor with aluminum nanowire polarization filters[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 22997-23012.

[11] Tyo J S, LaCasse C F, Ratliff B M. Total elimination of sampling errors in polarization imager obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3187-3189.

[12] Hou Junfeng. Studies and applications of polarimeter's polarization calibration with high precision[D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2013.
侯俊峰. 偏振分析器的高精度偏振定标方法研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院国家天文台, 2013.

[13] Gao S, Gruev V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters[J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26161-26173.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net