

偏振成像探测系统的非一致性校正方法

刘 晓, 张 磊, 王 峰, 薛模根, 郭泽成

(解放军炮兵学院信息工程系, 合肥 230031)

摘 要: 为提高偏振成像探测的实时性, 在分析偏振方向和响应度非一致性的基础上, 提出一种新的校正方法, 选用三镜头偏振成像方式, 对校正后的图像进行偏振信息解析, 从而实现偏振成像探测系统的校正。仿真实验结果表明, 该方法能够有效提高图像的可视化效果。

关键词: 偏振成像; 斯托克斯参量; 非一致性校正

Non-uniform Calibration Method in Polarization Imaging Detection System

LIU Xiao, ZHANG Lei, WANG Feng, XUE Mo-gen, GUO Ze-cheng

(Dept. of Information Engineering, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031)

【Abstract】 In order to enhance the real-time of polarization imaging detection, a novel calibration method is proposed, on basis of analyzing the non-uniform polarization direction and responsibility. The imaging method with three-lens is used to resolve the polarization information of calibrated image, which implements the calibration of polarization imaging detection system. Simulation experimental results show this method can promote the visualization effect of images.

【Key words】 polarization imaging; Stokes parameter; non-uniform calibration

1 概述

随着偏振成像理论的发展, 偏振成像探测技术已成为现代遥感与战场侦察中一种非常重要的探测手段^[1]。目前的偏振成像探测系统主要以三镜头和单镜头成像方式为主^[2-3]。其中, 采用三镜头成像方式的偏振探测系统能够实时获取 3 个不同偏振方向的图像, 从而计算目标的偏振信息。这种成像方式在实时采集、结构设计等方面具有明显优势。然而, 由于 CCD 成像探测器之间的响应度、偏振分析器之间不一致性等因素的影响, 各路成像模块的成像参量存在差别, 使相同采集条件下, 获取的偏振图像存在亮度、纹理、色泽等特征的细微畸变, 导致提取目标偏振信息存在偏差, 因此国内外学者对多路成像系统的非一致性校正方法进行研究^[4], 但目前提出的方法都具有一定局限性, 很难兼顾影响偏振成像质量的诸多因素, 因此, 很难找到一种通用的校正方法。

本文研究三镜头偏振成像探测系统, 从其偏振成像机理出发, 分析产生偏振成像探测系统非一致性误差的原因, 提出一种对偏振方向和响应度非一致性进行检测的方法。

2 偏振成像机理

偏振成像探测系统的工作流程如图 1 所示。

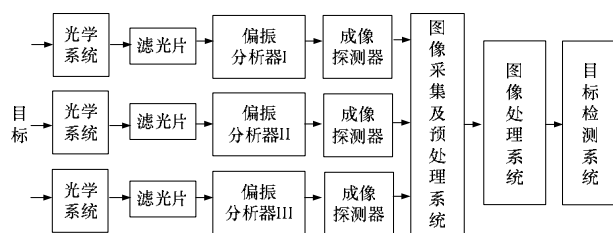


图 1 偏振成像探测系统流程

从图 1 可以看出, 该系统由偏振成像光学系统、滤光片、

偏振分析器、CCD 成像探测器、偏振图像同步采集单元、目标检测单元等部分组成。偏振成像光学系统分别包含 3 个不同偏振方向的偏振片, 完成对 3 个不同偏振方向的目标能量的采集。

偏振信息通常以斯托克斯参量 $(I, Q, U, V)^T$ 表示, 其中, I 为非偏振光强; Q 和 U 分别代表在 2 个方向上的线偏振; V 代表圆偏振。

斯托克斯参量都是具有强度的量纲, 可以使用光电的方法进行测量。假设来自目标辐射偏振态的斯托克斯参量 $S_i = (I_i, Q_i, U_i, V_i)^T$, 光学系统的线偏振分析器的 Mueller 矩阵为 M_a 。透过偏振器的出射光的偏振态的斯托克斯参量 $S_o = (I_o, Q_o, U_o, V_o)^T$, 则有:

$$S_o = M_a S_i \quad (1)$$

经计算可得:

$$I_o(\alpha) = \frac{1}{2}(I_i + Q_i \cos 2\alpha + U_i \sin 2\alpha) \quad (2)$$

其中, α 是偏振器透过轴相对于选定的参考坐标轴的夹角。

偏振度 P 和偏振角 θ 分别为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 可以得到被测目标的偏振态。如果只要求获得入射光线偏振态的斯托克斯参量 (I_i, Q_i, U_i) , 则需在

作者简介: 刘 晓(1984 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 偏振成像, 偏振信息解析; 张 磊、王 峰, 讲师、博士; 薛模根, 教授、博士、博士生导师; 郭泽成, 硕士研究生

收稿日期: 2009-03-01 **E-mail:** liuxiao_0007@163.com

α 取的 3 个角度位置上进行测量。本文选取的 α 分别为 0° 、 60° 和 120° ，根据式(5)可以计算来自目标光波的斯托克斯参量 (I_o, Q_o, U_o) 图像数据。

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(I_o(0^\circ) + I_o(60^\circ) + I_o(120^\circ)) \\ Q = \frac{2}{3}(2I_o(0^\circ) - I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)) \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)) \end{cases} \quad (5)$$

从式(3)~式(5)可以看出，影响偏振信息解析的因素包括 3 个 CCD 成像探测器响应的非一致性及偏振方向 α 的误差。由于 CCD 成像器件和偏振分析器自身特性的限制以及安装的误差，必须对偏振方向的一致性以及 CCD 成像探测器响应的一致性进行校正，从而实现偏振信息的准确提取。

3 非一致性校正方法

3.1 偏振方向非一致性校正

为提高偏振成像探测系统所获取数据的准确性，对系统的 3 个偏振透过轴方向进行测量，以检验 3 个偏振片的方向是否按当初设计的 0° 、 60° 和 120° 装配固定并加以校正，实验装置如图 2 所示。

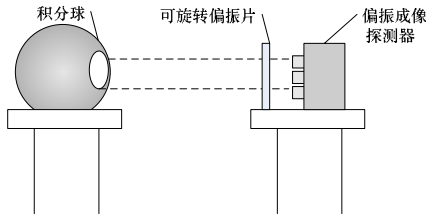


图 2 非一致性校正实验装置

根据光的偏振原理，只要在成像系统的 3 块固定偏振片前再放置一块可旋转偏振片，当可旋转偏振片与其中一块固定偏振片透过轴垂直时消光最大，因此，设计以下方法测量偏振方向：

- (1) 将 0° 偏振通道对准积分球后，旋转偏振片，当消光最大时记录步进电机读数；
- (2) 将 60° 偏振通道对准积分球，继续旋转偏振片，当消光比最大时再次记录步进电机读数，前后 2 次步进电机的读数之差即为 60° 偏振通道的真实透过轴方向；
- (3) 按照以上方法即可得到 120° 偏振通道的真实透过轴方向。

通过测定，3 个偏振片的安装角度分别为 0° 、 53.5° 和 108.5° ，由于受到步进电机精度限制，因此其偏振角度检测精度为 $\pm 0.5^\circ$ 。

3.2 响应度非一致性校正

偏振成像探测系统获取目标的 3 个偏振方向的强度图像，进行偏振信息解析。在理想条件下，基于积分球的偏振成像校正系统中各偏振方向通道的探测器响应输出应具有一致性。但由于偏振成像探测系统中 3 路偏振通道的光学系统透过率和 3 个 CCD 成像探测器响应度的不完全一致，从而导致各通道不同的响应输出，因此要对 3 个偏振方向响应非一致性进行定标并加以校正。

由于积分球内表面可看成理想朗伯反射面，且入射光经过多次反射后是完全非偏光，因此积分球的出射光可以看成理想的均匀非偏光。而对均匀光源成像后的图像数据分析发现，偏振成像探测系统中的 3 个偏振通道对积分球出射的均

匀非偏光的响应度非一致性较严重。以 0° 图像为基准，分别与 60° 和 120° 进行灰度数值比较，灰度值最大差别接近 20%。由偏振成像探测系统的响应度不一致性带来的误差将影响偏振信息的准确获取。

在相机的线性工作范围内，响应度非一致性的校正方法是分别对各通道信号进行均匀性校正和扣除暗电流后，选择 0° 偏振通道输出作为基准信号 $V_1(i, j)$ ，并与测试时 60° 和 120° 通道的输出信号比较得到校正系数。

$$V_1(i, j) = h_2(i, j)V_2(i, j) = h_3(i, j)V_3(i, j) \quad (6)$$

其中， $V_2(i, j)$ 、 $V_3(i, j)$ 分别为 60° 和 120° 方向的信号； $h_2(i, j)$ 、 $h_3(i, j)$ 为对应偏振通道的校正系数。

图 3 为各积分时间的响应度非一致性检测的校正系数变化情况。

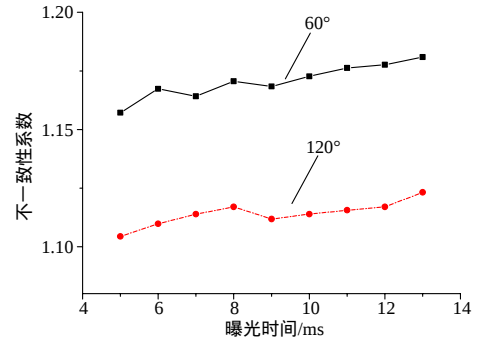


图 3 校正系数与积分时间的关系

4 实验结果

为验证非一致性给实际偏振信息采集、解析过程中带来的误差和校正后效果，选择校正前偏振成像探测系统采集的一组偏振图像进行实验。实验数据以雪后操场为场景，3 幅偏振图像是在基本相同的光学成像条件下(相同 CCD、成像距离、光照环境等)分别获得的。如图 4 所示，从左至右分别为 0° 、 60° 、 120° 偏振图像，3 幅图像分辨率均为 1024×1024 像素。



图 4 校正前的偏振图像

由于在视觉上很难辨别 3 幅校正前图像的差别，因此对校正前后图像的第 500 列~第 1024 列进行灰度值分布变化情况的比较分析，结果如图 5、图 6 所示。

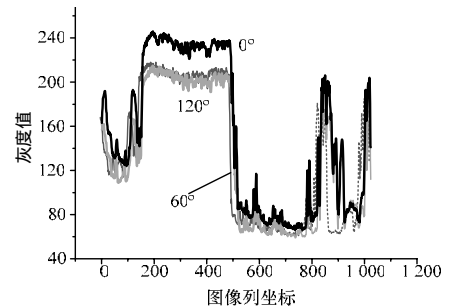


图 5 校正前偏振图像的灰度值分布

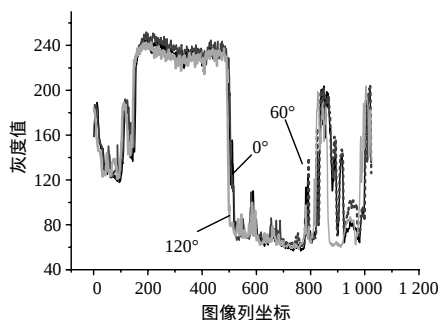


图6 校正后偏振图像的灰度值分布

从图5、图6可以看出,在校正前,3幅图像的灰度值存在较大差异,其中,60°和120°偏振图与0°偏振图在灰度值上的差异在200~500区间段差异较大,最大处达到22%。经过偏振方向和响应度非一致性校正后,3个方向偏振图的像元灰度值分布趋于相同,3幅图像的非一致性得到明显改善。

为进一步验证该方法对偏振信息解析的校正效果,进行如下实验:

(1)对3幅原始偏振图像进行偏振解析处理,得到偏振角图像和偏振度图像,如图7(a)、图7(b)所示。

(2)对3幅原始偏振图像进行一步校正:对原始图像进行偏振方向非一致性校正,并解析出偏振角图像和偏振度图像,如图7(c)、图7(d)所示。

(3)对3幅原始偏振图像进行二步校正:对原始图像同时进行偏振方向和响应度非一致性校正,并解析出偏振角图像和偏振度图像,如图7(e)、图7(f)所示。

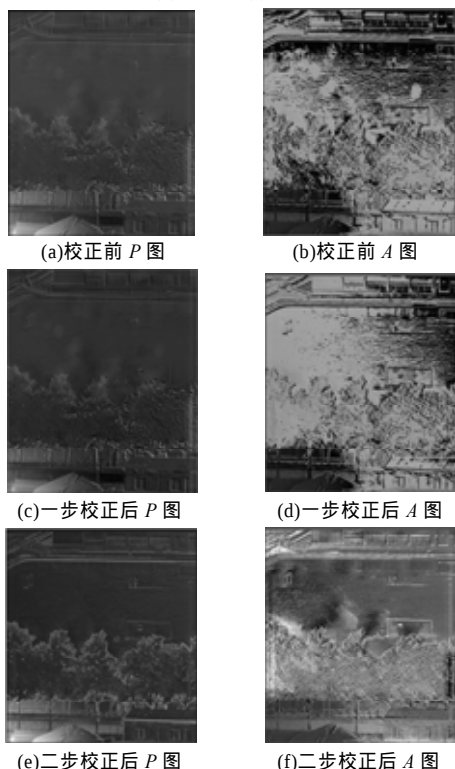


图7 校正前后的比较结果

从图7可以看出,未经校正的 P (偏振度)图较模糊;经过一步校正后的 P 图亮度整体降低,但清晰程度有一定提高;经过二步校正后的 P 图进一步提高了图像的清晰程度和对比度。未经校正的 A (偏振角)图轮廓模糊,噪点较多;经一步校正后的 A 图去除了部分噪点,但损失了图像的细节信息;经二步校正后的 A 图保留了图像细节信息,同时降低了图像中的噪声,提高可视化效果。

为对校正效果进行定量评价,分别计算校正前后偏振图像的均方误差值(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和信息熵,结果如表1所示。

表1 图像评价结果

图像处理内容	误差值	峰值信噪比	信息熵
一步校正后 A 图	438	21.716 062 0	6.360 1
二步校正后 A 图	1 926	15.284 240 0	6.536 0
一步校正后 P 图	168	25.877 710 7	5.848 2
二步校正后 P 图	1 076	17.338 990 0	6.005 8

从表1可以看出,一步校正后的偏振图像的 MSE 均小于二步校正后的偏振图像。这说明一步和二步校正对原图都有校正作用,但是经过二步校正后,图像的质量提高较大。一步校正后的偏振图像与原图相比去除了部分噪声但丢失了细节信息,从而造成 $PSNR$ 较大。而二步校正后的偏振图像在消除噪声的同时保留图像的细节信息,从而计算出的 $PSNR$ 略小于一步校正后偏振图像的 $PSNR$ 。一步校正后偏振信息图像的熵小于二步校正后的偏振图像,这是由于一步校正后丢失部分细节信息造成的。从评价指标可以发现,经过一步校正后的偏振图能够去除因偏振方向非一致性造成的噪声,但丢失部分细节信息,而经过二步校正后,既能去除噪声,又能够保留并突出目标的细节信息。

5 结束语

通过对偏振成像机理以及偏振成像探测系统产生非一致性误差的分析,建立偏振成像探测系统的偏振方向和响应度非一致性校正方法。对不同校正方法进行实验验证。定性和定量分析一步校正和二步校正后的偏振图像,实验结果表明,通过偏振方向和响应度非一致性的二步校正方法可以有效去除原图的噪声,并能保留图像细节信息,提高图像的可视化效果。此方法在偏振成像的实际应用中具有一定意义。

参考文献

- [1] Yemelyanov K. Polarization Enhanced Visual Surveillance Techniques[C]//Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networking, Sensing, and Control. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [2] 汪震,乔延利,洪津,等. 金属板热红外偏振的方向特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 49-52.
- [3] 杨伟峰,洪津,乔延利,等. 无人机机载偏振CCD相机光机系统设计[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 469-472.
- [4] 吴琼,黄海明,刘金刚. 适用于光学运动捕捉数据校正的拟合算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(19): 221-223.

编辑 陈文