

面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统

杨敏^{1*}, 徐文斌¹, 田禹泽^{2**}, 孙振远³, 孙宪中¹

¹光学辐射重点实验室, 北京 100854;

²北京机电工程研究所, 北京 100074;

³北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094

摘要 为了提高传统分时型红外偏振成像的速度, 设计了适用于中波红外热像仪的检偏器组件, 将红外热像仪改装成中波红外偏振成像装置, 用于获取目标场景的红外偏振信息。该装置通过电机以 900 r/min 速度匀速驱动红外偏振片旋转, 采集不同偏振方向的红外强度图像。利用单像元非均匀性差分图像校正方法对红外图像中的冷反射进行扣除, 利用迭代排序方式对校正后的红外强度图像进行处理, 结合构建的斯托克斯矢量模型, 计算连续相邻的三幅红外强度图像的红外偏振度和偏振角, 保证与红外强度图像有相同的成像帧频。实验结果表明, 该装置能够稳定输出待测目标的红外偏振度和偏振角图像, 输出红外偏振图像的帧频为 45 frame/s, 满足对变化场景实时红外偏振探测的需求。

关键词 成像系统; 红外偏振成像; 旋转偏振片; 冷反射; 迭代排序方法

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1511001

Time-Sharing Infrared Polarization Imaging System for Moving Target Detection

Yang Min^{1*}, Xu Wenbin¹, Tian Yuze^{2**}, Sun Zhenyuan³, Sun Xianzhong¹

¹Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China;

²Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;

³Beijing Space Information Relay and Transmission Technology Research Center, Beijing 100094, China

Abstract In this study, an analyzer assembly suitable for developing a midwave infrared thermal imaging camera is designed to improve the speed of traditional time-sharing infrared polarization imaging. Further, the model of the mid-wave infrared thermal imaging camera is converted into a midwave infrared polarization imaging device to obtain the infrared polarization information of the target scene. This device uses a motor to ensure that the infrared polarizer can rotate at a uniform speed of 900 r/min and collects infrared intensity images in different polarization directions. A single pixel non-uniform differential image correction method is used to remove the cold reflection of infrared images, and the iterative sorting method is used to process an image with the corrected infrared intensity. In addition, based on the constructed Stokes vector model, computing the adjacent three consecutive intensity of infrared image of the infrared polarization and polarization angle, assurance and the intensity of the infrared image has the same imaging frame frequency. Experiment results show that the aforementioned device can achieve stable output of the infrared polarization degree and polarization angle with respect to the target to be measured. The frame frequency of the output infrared polarization image is 45 frame/s, which is in accordance with the real-time infrared polarization requirements for moving target detection.

Key words imaging systems; infrared polarization imaging; rotary polarizer; cold reflection; iterative sorting method

OCIS codes 110.5405; 260.5430

1 引 言

红外成像探测是一种基于目标红外辐射强度特

征的探测技术, 具有作用距离远、抗干扰性强和全天候工作等优点, 可以广泛应用于各个领域^[1]。当目标与背景之间的温差较小时, 则两者之间的红外辐

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-15; 录用日期: 2020-05-06

* E-mail: yamor12@126.com; ** E-mail: ustctyz@126.com

射强度差异较小,此时红外成像探测技术难以有效区分目标与背景,使得该技术存在一定的局限性^[2]。红外偏振成像探测是一种新型的探测技术,与传统的红外成像探测技术相比,其不仅能够获得目标场景的红外辐射强度信息,还可以获得偏振度和偏振角等参数,增加了目标场景的维度信息,这对提高目标探测与识别具有重要意义^[3]。

红外偏振成像探测技术通过获取不同偏振方向的红外强度图像,从而解算出描述目标偏振信息的斯托克斯(Stokes)矢量,进而获得偏振度或偏振角参数。按照红外强度图像的获取方式,现有的红外偏振成像装置大体上可分为4种类型^[4]:分时型、分振幅型、分孔径型和分焦平面型。其中分时旋转偏振片型红外偏振成像装置采用时序型的工作方式,偏振片每旋转到固定角度则采集一帧红外强度图像,其适用于静止或准静止场景中的红外偏振探测;分振幅和分孔径型红外偏振成像装置均采用多光路结构,可实现实时偏振成像,其缺点在于光路系统复杂,能量衰减大,图像配准难度高;分焦平面型红外偏振成像装置在焦平面的每个像元前胶合一层微偏振片,可实现实时偏振探测,但该装置存在微偏振阵列与焦平面探测器像元之间的配准难度大、消光比低及像元之间的串扰效应等问题。

相对于其他实时型红外偏振成像装置,分时旋转偏振片型红外偏振成像装置具有结构简单、光通量高和成本低等优点,在航空航天偏振探测领域得到很好的应用^[5-6]。但是由于其成像速度较慢,不能满足动态目标偏振探测的要求,目前常见的分时旋转偏振片型红外偏振成像的速率最快为15 frame/s^[7],实时偏振探测的能力依然不足。因此,本文对传统的分时旋转偏振片型红外偏振成像方式进行改进,通过高速旋转偏振片的方式,并与红

外焦平面探测器同步曝光,结合迭代排序的红外偏振图像处理方法,提高了红外偏振度和偏振角图像的输出帧频。稳定工作的状态,系统连续输出红外偏振图像的速率为45 frame/s,能够满足运动目标红外偏振探测的要求。

2 原理基础

2.1 基于 Stokes 矢量的光波偏振态测量

物体表面反射和自发辐射光束的偏振态均可利用 Stokes 矢量 $\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T$ 来表示^[8],其中 I 表示总光强; Q 表示水平光强与垂直光强之差; U 表示 45° 和 135° 方向线偏振光的光强之差; V 表示左旋圆和右旋圆偏振光强之差。自然界中大多数物体的圆偏振分量很小,可认为 $V=0$ 。一束偏振态为 $\mathbf{S}_{in} = [I_{in} \quad Q_{in} \quad U_{in}]^T$ 的入射光经过理想偏振片后,透射到红外探测器的光强 I_{out} 可表示为

$$I_{out} = (I_{in} + Q_{in} \cos 2\theta + U_{in} \sin 2\theta) / 2, \quad (1)$$

式中: θ 为偏振片透射光轴与参考方向 x 轴的夹角。为了测量入射光波的偏振态,最为简便的方法是将偏振片的 θ 转动至三个特定角度,通常选用 0° 、 60° 和 120° ,就可以从红外探测器的输出中获得三个不同偏振方向的光强,进而解算入射光波的两个 Stokes 矢量参数,整体测量流程如图 1 所示。其中

$$\begin{cases} I_{in} = 2[I_{out}(0^\circ) + I_{out}(60^\circ) + I_{out}(120^\circ)]/3 \\ Q_{in} = 2[2I_{out}(0^\circ) - I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)]/3 \\ U_{in} = 2\sqrt{3}[I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)]/3 \end{cases} \quad (2)$$

基于 Stokes 矢量可求得入射光波的偏振度(DOP)和偏振角(AOP),表达式为

$$x_{DOP} = \sqrt{Q_{in}^2 + U_{in}^2} / I_{in}, \quad (3)$$

$$x_{AOP} = [\arctan(U_{in}/Q_{in})] / 2. \quad (4)$$

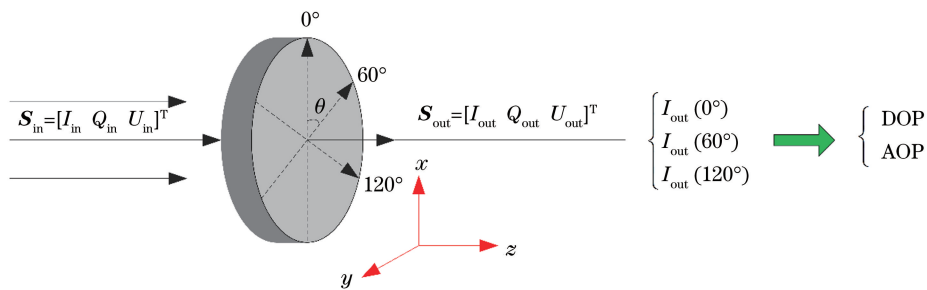


图 1 光波偏振态测量原理图

Fig. 1 Schematic of measuring principle of light wave polarization state

2.2 高速旋转偏振片的检偏器

实验设计的高速旋转偏振片型红外偏振成像装

置,其基本工作原理是在检偏器装置中单一偏振片快速旋转的条件下获取三个偏振方向的红外强度图

像,并由三幅红外强度图像解算得到红外偏振图像。测量过程中,偏振片高速且匀速旋转,其匀速旋转的角速度为 ω ,偏振片在 t 时间内旋转的角度可表示

为 $\theta = \omega t$ 。红外焦平面探测器在偏振片旋转到特定角度时对光电流进行积分,在 $[t_0, t_1]$ 范围内红外焦平面探测器得到的光强响应电压 V_{out} 为

$$V_{out} = k \int_{t_0}^{t_1} I_{out} dt / 2 = k \left[\int_{t_0}^{t_1} I_{in} dt + \int_{t_0}^{t_1} Q_{in} \cos(2\omega t) dt + \int_{t_0}^{t_1} U_{in} \sin(2\omega t) dt \right] / 2, \quad (5)$$

式中: k 为光电转换系数。设计的检偏器装置在偏振片旋转至 0° 、 60° 和 120° 时开始曝光采集,每次曝光结束后,偏振片旋转过的角度设为 φ ,如图2所示。实验需要在 $[0^\circ, \varphi]$ 、 $[60^\circ, 60^\circ + \varphi]$ 和 $[120^\circ,$

$120^\circ + \varphi]$ 三段区间对光电流进行积分,对应区间的曝光时间分别为 $[0, \varphi/\omega]$ 、 $[60^\circ/\omega, (60^\circ + \varphi)/\omega]$ 和 $[120^\circ/\omega, (120^\circ + \varphi)/\omega]$,则红外焦平面探测器对应的光强响应分别为

$$\begin{cases} V_{out}(0^\circ) = k[2\varphi \cdot I_{in} + \sin 2\varphi \cdot Q_{in} - \cos 2\varphi \cdot U_{in} + U_{in}] / 4\omega \\ V_{out}(60^\circ) = k[2\varphi \cdot I_{in} + \sin(2\varphi + 120^\circ) \cdot Q_{in} - \cos(2\varphi + 120^\circ) \cdot U_{in} - \sqrt{3}Q_{in}/2 - U_{in}/2] / 4\omega \\ V_{out}(120^\circ) = k[2\varphi \cdot I_{in} + \sin(2\varphi + 240^\circ) \cdot Q_{in} - \cos(2\varphi + 240^\circ) \cdot U_{in} + \sqrt{3}Q_{in}/2 - U_{in}/2] / 4\omega \end{cases} \quad (6)$$

求解(6)式可以得到入射光波的三个 Stokes 矢量参数,表达式为

$$\begin{cases} I_{in} = 2\omega [V_{out}(0^\circ) + V_{out}(60^\circ) + V_{out}(120^\circ)] / 3k\varphi \\ Q_{in} = 2\omega \{ \sin 2\varphi [2V_{out}(0^\circ) - V_{out}(60^\circ) - V_{out}(120^\circ)] / (1 - \cos 2\varphi) - \sqrt{3} [V_{out}(60^\circ) - V_{out}(120^\circ)] \} / 3k \\ U_{in} = 2\omega \{ [2V_{out}(0^\circ) - V_{out}(60^\circ) - V_{out}(120^\circ)] - \sqrt{3} \sin 2\varphi [V_{out}(60^\circ) - V_{out}(120^\circ)] / (1 - \cos 2\varphi) \} / 3k \end{cases} \quad (7)$$

结合(3)式、(4)式和(7)式可解算得到目标场景的红外偏振度和偏振角图像。经实验验证,积分时间与旋转速度的乘积决定 φ 值在 $[0^\circ, 8^\circ]$ 范围内变化,从而使设计的红外偏振探测系统的偏振测量误差较小。

为了提高红外偏振成像的速率,对设计的红外偏振成像的装置进行两点改进。

1) 采用连续高速旋转偏振片的机械结构,中波红外热像仪在偏振片旋转至三个特定角度(0° 、 60° 、 120°)时进行红外强度图像的采集,通过电机以 900 r/min 旋转速度来提升红外偏振图像的获取速率。

2) 采用一种迭代排序的方法对获取的红外强度图像进行处理,每个旋转周期内偏振片角度变化如图2所示。第一幅红外偏振图像是在角度为 0° 、 60° 和 120° 时采集的红外强度图像通过(3)式和(6)式解算得到,利用相同的方法,对 60° 、 120° 和下一个角度为 0° 的红外强度图像进行计算以得到第二幅红外偏振图像,依次进行迭代解算得到剩下的红外偏振图像,解算过程如图3所示。利用所有红

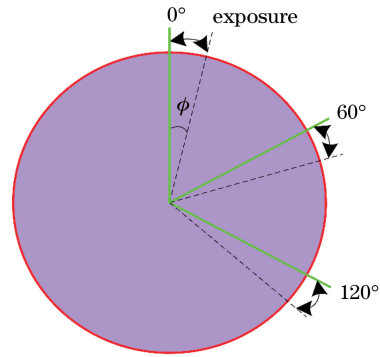


图2 每个旋转周期内偏振片角度变化示意图
Fig. 2 Schematic of polarizer angle change during each rotation period

外偏振信息解算的图像都是经过尺度不变特征变换(SIFT)配准后的红外图像,配准过程中,选取 $0^\circ - 60^\circ - 120^\circ$ 或 $60^\circ - 120^\circ - 0^\circ$ 或 $120^\circ - 0^\circ - 60^\circ$ 的中间图像作为基准,将其他两个偏振方向的图像校正到同一基准。此外,传统的分时型红外偏振系统仅适用于静态目标测量,对于动态目标或变化场景,实际机械旋转红外偏振成像系统的构建需要考虑典型目

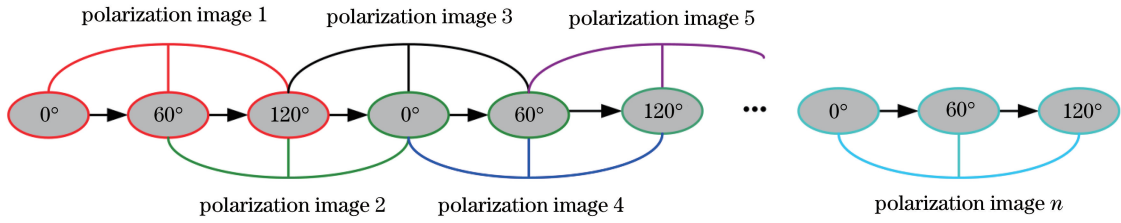


图 3 利用迭代排序的方法解算红外偏振图像的过程

Fig. 3 Process of solving infrared polarized images by iterative sorting method

标的运动速度、系统的积分时间设置、检偏器旋转速度与积分时间配合等多种因素,才能保证输出的红外偏振图像与红外强度图像具有相同的成像帧频。

2.3 冷反射效应扣除

实验设计一种基于金属线栅型的红外偏振成像装置,偏振片垂直放置于制冷型红外热像仪光学镜头的前端,焦平面探测器与偏振片及镜筒之间有明显的温度差异,从而形成冷反射。焦平面探测器不仅接收目标场景的光线,还接收红外热像仪内部自身辐射经过偏振片表面反射的冷光线,该冷光线叠加在目标场景成像信号上形成不可滤除的噪声信号,因此在热成像图的视场中心形成黑斑^[9]。图 4 为典型红外偏振成像冷反射效果。

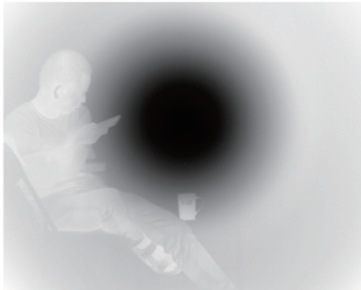


图 4 典型的红外偏振冷反射现象

Fig. 4 Typical infrared polarized cold reflection phenomenon

采用单像元非均匀性差分图像校正方法扣除不同偏振方向的红外强度图像中的冷反射。当偏振片旋转至 0° 、 60° 和 120° 位置时,利用红外偏振成像装置分别采集含有冷反射的目标场景图像 $I_{out}^{0^\circ}(i, j)$ 、 $I_{out}^{60^\circ}(i, j)$ 和 $I_{out}^{120^\circ}(i, j)$, 其中 (i, j) 表示图像上点的坐标。实验将在相同采样位置处获取冷反射基准图像,该图像通常是将仪器对准低温黑体(绝对 0°C) 所测量得到,但是由于受到实验条件限制,无法获取低温黑体下的冷反射基准图像,于是利用黑色挡板遮挡仪器入瞳处的光线,从而采集冷反射基准图像 $I_{base}^{0^\circ}(i, j)$ 、 $I_{base}^{60^\circ}(i, j)$ 和 $I_{base}^{120^\circ}(i, j)$, 再对基准图像中每个像元进行单点非均匀性校正,表达式为

$$\begin{cases} I_{offset}^{0^\circ}(i, j) = I_{base}^{0^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{base}^{0^\circ}(i, j)/(m \times n) \\ I_{offset}^{60^\circ}(i, j) = I_{base}^{60^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{base}^{60^\circ}(i, j)/(m \times n), \\ I_{offset}^{120^\circ}(i, j) = I_{base}^{120^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{base}^{120^\circ}(i, j)/(m \times n) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $m \times n$ 为探测器的总像元数,其中 m 、 n 为探测总像元的行数和列数。将冷反射场景图像与校正的冷反射基准图像进行对应差分,即可消除冷反射效应,表达式为

$$\begin{cases} I_{corrected}^{0^\circ}(i, j) = I_{out}^{0^\circ}(i, j) - I_{offset}^{0^\circ}(i, j) \\ I_{corrected}^{60^\circ}(i, j) = I_{out}^{60^\circ}(i, j) - I_{offset}^{60^\circ}(i, j) \\ I_{corrected}^{120^\circ}(i, j) = I_{out}^{120^\circ}(i, j) - I_{offset}^{120^\circ}(i, j) \end{cases} \quad (9)$$

结合不同偏振通道的红外辐射定标方法^[10],利用高精度黑体对不同偏振方向扣除冷反射后的图像进行定量处理,从而得到精准、合理的红外图像。

3 红外偏振成像装置设计

红外偏振成像装置主要由中波红外热像仪、检偏器组件和计算机组成。红外热像仪为美国 FLIR 公司生产的 X6530sc 中波红外热像仪,探测波段为 $1.5 \sim 5.1 \mu\text{m}$, 红外焦平面探测器的总像元数为 640×512 , 像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 。热像仪采用外部触发方式,当热像仪外部触发器接收到起偏器传输的脉冲上升沿信号时,立即开始采集红外辐射强度图像,利用中波红外热像仪自带的集成图像采集软件采集图像。检偏器组件是中波红外偏振成像装置的核心部件,其是对入射至系统的红外光进行检偏,主要由电机、偏振片轮、驱动器和高精度增量编码器组成。其中电机采用中空型永磁无刷直流电机,在电机定子绕组端部固定霍尔检测元件以检测电子转子上的磁钢,从而实时反馈电机转速信息,在电机尾端固定精密增量感应式编码器,从而实时反馈电机旋转的位置角度;偏振片轮固定安装一片 Thorlabs 公司生产的 CaF_2 金属线栅红外偏振片,其消光比为

300:1,透过率大于80%,直径为50 mm。偏振片轮通过驱动电机带动其快速旋转,每个旋转周期内编码器实时记录偏振片轮旋转的三个固定角度,分别为 0° 、 60° 和 120° ,同时传输稳定的脉冲信号给红外热像仪以采集图像。

检偏器通过电机带动偏振片快速且匀速旋转,电机的步距角为固定值,当输出一个脉冲信号时,表示偏振片旋转至特定的检偏角度。系统按照功能可划分为三个部分:检偏器控制、检偏器与红外热像仪通信和红外热像仪与上位机软件通信。检偏器控制主要为了实现电机的匀速控制和实时角度信息的采集;检偏器与红外热像仪通信部分利用上升沿脉冲信号进行通信,通过BNC(Bayonet Neill-Concelman)接口进行连接,从而可实现协同工作;红外热像仪与上位机软件通信部分中,红外热像仪作为服务器端,上位机软件作为客户端,通过网络通信协议实现红外强度图像的实时传输。上述三部分协调工作可实现红外偏振图像的采集。

整体工作流程:用户通过上位机软件给检偏器组件发出快速旋转信号,控制指令通过串口协议传输至检偏器控制单元,驱动电机以预定每秒15圈的速度带动红外偏振片匀速且快速旋转,同时编码器实时记录旋转角度。当偏振片旋转到设置的偏振采集角度时,立即传输上升沿脉冲信号触发红外热像仪采集数据,并通过网络通信协议将采集到的数据传输至上位机以生成红外辐射强度图像文件。在每个偏振片旋转周期内都会有三幅红外强度图像回传至上位机。后续采用MATLAB软件对红外辐射强度图像文件进行离线处理,计算待测目标场景的红外偏振度和偏振角信息。

4 实验与分析

4.1 红外偏振成像装置帧频测试分析

在实验室环境下,使用示波器对红外偏振成像装置的成像帧频进行测试。通过上位机软件控制电机以每秒15圈的速度匀速旋转,且在指定位置持续发送脉冲信号,同时利用示波器采集脉冲信号。每个旋转周期内,检偏器装置共传输三个脉冲信号,分别为 0° 信号、 60° 信号和 120° 信号,其中 0° 信号与 60° 信号之间的间隔时间为11.142 ms,每个旋转周期的时间为66.852 ms。稳定工作的情况下,系统每秒能够采集45帧不同偏振方向的红外强度图像,再

结合迭代排序的方式每秒同样可以输出45幅红外偏振图像。若以 45° 为间隔,即得到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4个偏振方向,可将该系统的红外偏振图像输出帧频提高至60 frame/s。

4.2 红外偏振成像装置旋转周期和积分时间分析

由(6)式可知,红外偏振成像装置的旋转周期和积分时间对解算的 I 、 Q 和 U 存在一定影响,为了更清晰地理解所提系统的旋转周期和积分时间对红外偏振度和偏振角的影响,开展了户外运动轿车的红外偏振成像测量实验。其中旋转周期影响分析实验的积分时间,此时设置为1.5 ms,旋转周期分别设置为400,600,900 r/min;积分时间影响分析实验的旋转周期,此时设置为900 r/min,积分时间分别设置为0.5,1.0,1.5 ms。实验过程中,红外偏振成像系统架设在三脚架上,并置于距离轿车正前方20 m处,轿车以15 km/h的速度作匀速往返运动,结合轿车的动态响应范围,防止红外热像仪的探测器出现过饱和,应设置合理的积分时间对采集到的数据进行离线处理,得到不同旋转周期和不同积分时间时的红外偏振度和偏振角图像。

图5为计算不同旋转周期得到的红外偏振度图像和红外偏振角图像。从图5可以看到,在轿车的前盖和前窗玻璃处产生较强的偏振特性,这是由于前窗玻璃和前盖表面较光滑,太阳光经其表面产生反射,反射光会产生偏振特性,与中波红外偏振产生机理有关。整体上,不同旋转周期的红外偏振度和偏振角图像变化差异较小。此外,对比不同旋转周期在不同区域的红外偏振度和红外偏振角值,结果如表1所示。从表1可以看到,不同旋转周期下,利用不同偏振方向红外强度解算的红外偏振度和红外偏振角变化较小,因此旋转周期对红外偏振信息的影响较小。

图6为不同积分时间的红外偏振和红外偏振角图像。从图6可以看到,不同积分时间下,红外偏振度和偏振角图像变化差异较大。不同积分时间下,与图5中相同区域1和区域2内的红外偏振度和红外偏振角值进行对比,结果如表2所示。从表2可以看到,积分时间对红外偏振信息的影响较大,且变化规律不明显。这主要是积分时间的变化使得红外偏振信息解算的 I 、 Q 、 U 存在非线性变化,从而导致计算的红外偏振度和红外偏振角呈非线性变化规律。

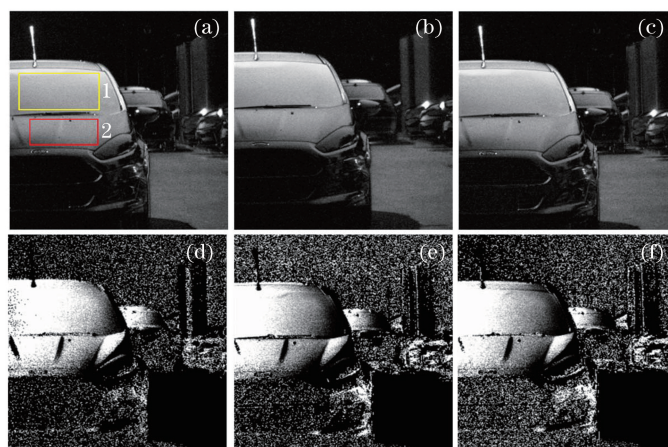


图 5 不同旋转周期的红外偏振度和红外偏振角图像。(a)(b)(c)旋转周期为 400,600,900 r/min 的红外偏振度图像;(d)(e)(f)对应的红外偏振角图像

Fig. 5 Infrared DOP and infrared AOP images with different rotation periods. (a) (b) (c) Infrared polarization degree images with rotation periods of 400, 600, 900 r/min; (d) (e) (f) corresponding infrared polarization angle images

表 1 不同旋转周期在不同区域的红外偏振度和红外偏振角值对比

Table 1 Comparison of infrared DOP and infrared AOP values in different regions with different rotation periods

Rotation period / (r · min ⁻¹)	Region 1		Region 2	
	DOP	AOP	DOP	AOP
400	0.0267	0.4783	0.0199	0.4097
600	0.0264	0.4781	0.0202	0.4162
900	0.0265	0.4784	0.0197	0.4156

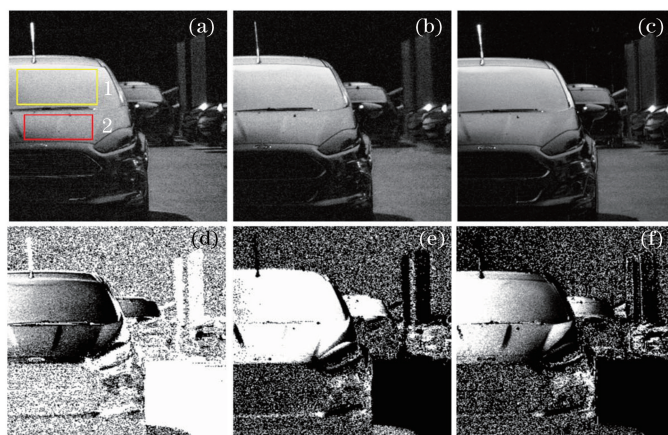


图 6 不同积分时间的红外偏振度和红外偏振角图像。(a)(b)(c)积分时间为 0.5,1.0,1.5 ms 的红外偏振度图像;(d)(e)(f)对应的红外偏振角图像

Fig. 6 Infrared DOP and infrared AOP images with different integration times. (a) (b) (c) Infrared polarization degree images with integration times of 0.5, 1.0, and 1.5 ms; (d) (e) (f) corresponding infrared polarization angle image

表 2 不同积分时间在不同区域的红外偏振度和红外偏振角值对比

Table 2 Comparison of infrared DOP and infrared AOP values in different regions with different integration time

Integration time /ms	Region 1		Region 2	
	DOP	AOP	DOP	AOP
0.5	0.0234	-0.2535	0.0165	-0.3129
1.0	0.0251	0.4462	0.0172	0.4848
1.5	0.0264	0.4781	0.0202	0.4162

4.3 冷反射效应扣除验证

为了验证第 2.3 节所述的冷反射消除方法对实际场景的成像效果,对远处的建筑物进行红外偏振图像的采集与处理。图 7 为利用单像元非均匀性差分图像校正方法去除冷反射后获得不同偏振方向的场景图像,图中 image 1 为偏振方向为 0° 的红外图像, image 2 为偏振方向为 60° 的红外图像, image 3 为偏振方向为 120° 的红外图像。从图 7 可以看到,利用设计的红外偏振成像装置采集的红外图像存在

明显的冷反射现象,而且不同偏振方向的红外偏振图像中冷反射斑的位置均发生微偏移,这是偏振片轮的加工及装配的误差,导致红外偏振片不是完全垂直放置于光学镜头前端,使得偏振片在旋转过程中形成不同位置的冷反射斑。此外,从图 7 的差分校正结果可以看到,目标场景的冷反射现象几乎完全消除,进一步说明了所提方法的有效性,该方法可为后续红外偏振图像解算提供高质量的红外强度图像。

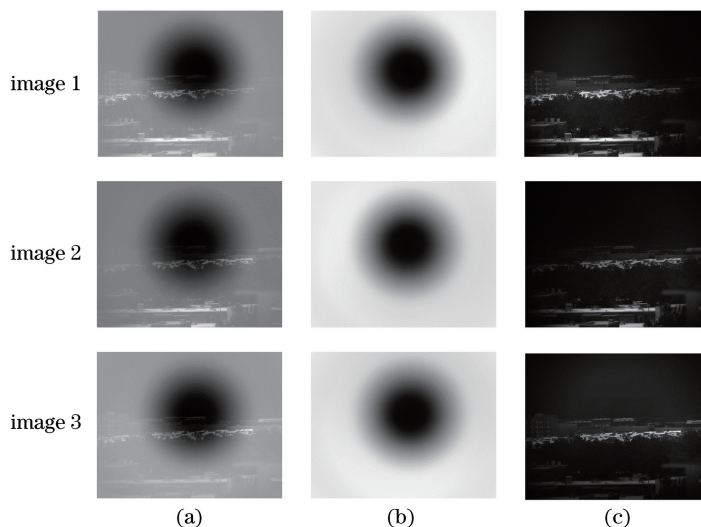


图 7 冷反射效应扣除处理结果。(a)不同偏振方向的红外强度图像;(b)冷反射斑基准图像;(c)校正后的红外强度图像

Fig. 7 Cold reflection effect deduction processing results. (a) Infrared intensity images with different polarization directions; (b) cold reflection spot reference images; (c) corrected infrared intensity images

4.4 实际场景红外偏振成像实验分析

为了验证设计的红外偏振成像装置能够满足实际运动场景的红外偏振成像探测,在晴朗天气的条件下,利用该装置对天空中飞行的客机进行红外偏振成像测量,对选取某一偏振帧的红外偏振图像进行分析,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,红外强度图像中飞机的细节特征模糊,没有很

好的显现,相比于红外强度图像,红外偏振度和偏振角图像中的飞机轮廓更清晰,飞机的边缘特征更为明显,这与以往研究结果较为一致^[11]。此外,红外偏振度图像中,飞机下方的建筑物都能清晰显现,红外偏振图像更能凸显目标的细节与轮廓特征,进一步证实了偏振成像装置更有利于目标识别。

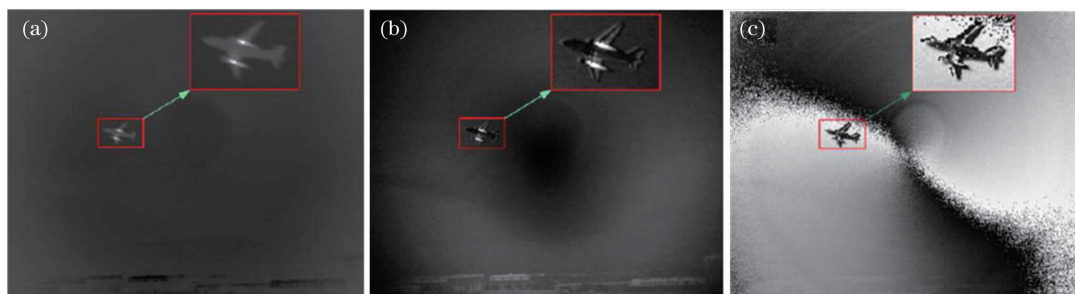


图 8 空中客机的红外偏振图像。(a)强度图像;(b)偏振度图像;(c)偏振角图像

Fig. 8 polarization polarization images of airbus. (a) Intensity image; (b) DOP image; (c) AOP image

进一步对比红外强度图像与红外偏振图像之间的差异,计算飞机与天空背景的对比值,该参数是影

响目标检测效果的重要参量。对比度定义为 $C = (x_T - x_B) / (x_T + x_B)$, 其中 x_T 为目标区域的平均

灰度值, x_B 为背景区域的平均灰度值, 结果如表 3 所示。从表 3 可以看到, 飞机在天空背景下的红外偏振度对比度和偏振角对比度分别为 0.3831 和 0.3405, 红外强度对比度仅为 0.0182, 红外偏振图像的对比度较红外强度图像的对比度有明显提升, 这与图 8 显示结果一致, 飞机的细节特征更为清晰, 因此利用红外偏振特征可提升目标的探测与识别能力。

表 3 空中客机红外图像的对比度结果

Table 3 Airbus infrared image contrast results

Type	Intensity	DOP	AOP
Contrast	0.0182	0.3831	0.3405

5 结 论

设计一种适用于分时型红外偏振成像系统的检偏器装置, 通过连续快速旋转偏振片的方式采集目标不同偏振方向的红外辐射强度图像, 并对图像中的冷反射进行有效扣除, 同时提出一种迭代排序的红外偏振图像解算方法, 使得输出的红外强度图像与红外偏振图像具有相同帧频。该装置能够稳定地获取总像元数为 640×512 、45 frame/s 的高质量红外偏振图像, 极大地提高了传统的旋转偏振片型红外偏振成像速度, 为运动目标红外偏振探测提供一种新思路。需要指出的是, 选用 60° 旋转角度进行检偏, 可稳定输出 45 frame/s 的红外偏振图像, 若选用 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4 个方向的旋转角度, 理论上可将分时偏振成像系统的偏振成像帧频提高至 60 frame/s。后续将重点研究如何消除积分时间对红外偏振信息解算所产生的误差, 从而获得目标真实的红外偏振特性, 这是未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Li Y, Lu Q, Bai P J. Situation and trend of uncooled infrared imaging systems for army equipment worldwide[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 581-593.
李煜, 陆强, 白丕绩. 非制冷红外成像系统在陆军装备中的应用现状及趋势[J]. *红外技术*, 2017, 39(7): 581-593.
- [2] Felton M, Gurton K P, Pezzaniti J L, et al. Comparison of the inversion periods for MidIR and LWIR polarimetric and conventional thermal imagery[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7672: 76720R.
- [3] 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.
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.
- [4] 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.
- [5] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: comparison with airborne multi-angle photo polarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781-792.
- [6] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822005.
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822005.
- [7] Zhang Z, Liu X Y, Wang J L, et al. Division-of-time long-wave infrared high frame frequency polarization imaging experiment[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(5): 508-514.
张哲, 刘欣悦, 王建立, 等. 分时型长波红外高帧频偏振成像实验研究[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(5): 508-514.
- [8] Stokes G G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources[J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1852(9): 233-258.
- [9] Xing Z C. Research on miniature telephoto multiband common aperture optical system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 90-95.
邢振冲. 灵巧型长焦多波段共口径光学系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 90-95.
- [10] Niu J Y. Research on the key technologies for access to infrared polarization characteristics of space targets[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 45-60.
牛继勇. 空间目标红外偏振特性获取关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 45-60.
- [11] Wang X, Liang J A, Long H B, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704002.
王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0704002.