

文章编号 1004-924X(2025)17-2744-10

## 面向无人机目标探测的分时型红外偏振成像系统

郭杰<sup>1,2</sup>, 赵开春<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;

2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:**针对分时型红外偏振成像系统在快速成像过程中的偏振响应稳定性问题,设计了一种长波红外偏振成像系统,用于无人机目标在红外强杂波背景下的目标探测。对偏振步进角度进行最优分析,通过角度误差模型仿真确定系统的最优步进角参数,从而减少偏振误差;设计了自适应检偏角度估计算法,通过时变参数型卡尔曼滤波算法实现角度的准确估计,以满足该系统在高转速下输出稳定偏振响应的需求。实验结果表明:在50 Hz的工作成像帧率下,经过滤波算法处理后的系统偏振响应波动降低91%,系统的偏振度精度达到了0.50%,偏振角精度达到了1.52°,相较于红外图像,偏振图像中的目标区域对比度可提升3~10倍。该成像系统能够提升无人机目标的对比度,满足红外强杂波背景下无人机目标的探测需求。

**关键词:**成像系统;红外偏振成像;卡尔曼滤波;对比度提升;背景抑制

**中图分类号:**O436.3 **文献标识码:**A

**doi:**10.37188/OPE.20253317.2744

**CSTR:**32169.14.OPE.20253317.2744

## Time-sharing infrared polarization imaging system for drone target detection

GUO Jie<sup>1,2</sup>, ZHAO Kaichun<sup>1\*</sup>

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

\* Corresponding author, E-mail: kaichunz@mail.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** A long-wave infrared time-sharing polarization imaging system was developed to address instability in polarization response during high-speed imaging and to enable detection of UAV targets against strong infrared clutter. An optimal polarization step angle was identified through analysis and angle-error model simulations to minimize polarization error. An adaptive polarization-angle estimation algorithm, based on a time-varying parametric Kalman filter, was implemented to provide accurate angle estimates and maintain a stable polarization response at high frame rates. Experimental results at a 50 Hz imaging rate demonstrate that the filtering algorithm reduces polarization response fluctuations by 91%, achieves a polarization accuracy of 0.50%, and attains a polarization-angle accuracy of 1.52°. Additionally, the target-region contrast in polarization images is enhanced by 3-10×. The proposed imaging system significantly

收稿日期:2025-05-03;修订日期:2025-06-13.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFB3906300)

improves UAV target contrast and satisfies detection requirements in environments with strong infrared clutter.

**Key words:** imaging systems; infrared polarization imaging; Kalman filter; contrast improvement; background suppression

## 1 引 言

长波红外成像方式主要依赖于红外传感器获取目标与背景间的红外辐射差异识别目标。但在城市环境中,作为背景的地物建筑或树木等物体的红外辐射较强,而作为目标的无人机等物体的红外辐射较弱,较难将目标与背景区分出来。相比之下,红外偏振成像方式可以捕获场景中不同物体的偏振状态差异,能够在强杂波干扰环境下区分人造目标与背景<sup>[1-3]</sup>。

利用偏振信息将目标物从背景中提取出来是偏振成像领域的研究重点。由于早期红外偏振成像系统成像速度慢,因此,偏振成像研究集中于静目标的探测。Cremer等通过长波红外偏振成像技术将隐藏于杂乱植被背景中的地雷轮廓突显出来<sup>[4]</sup>。Aron等使用长波红外偏振成像系统和红外热像仪分别对草原环境中的军用卡车及野外帐篷进行了成像测试<sup>[5]</sup>,验证了偏振成像技术可以显著提升对人造目标的探测性能。当研究人员研发出分焦平面偏振成像系统后,偏振成像的探测目标转向了动态物体。Bradley等分别使用红外成像技术和分焦平面偏振成像系统对遥控航模进行成像实验<sup>[6]</sup>,目标在偏振成像下相较于红外图像其信噪比提升3~36倍。由此可见,偏振成像系统的研制对偏振成像的应用至关重要。

偏振成像系统可分为四种成像方式,每种方式都有其局限性。其中,分振幅型系统的光学元件繁多,结构复杂<sup>[7]</sup>;分通道型系统需要对各通道图像进行标定校准<sup>[8]</sup>;分焦平面型存在低分辨率的缺陷从而影响偏振性能<sup>[9]</sup>;分时型无法同时获取不同偏振状态的强度。

与其他偏振成像方式相比,分时型成像具有结构简单、成本低和成像质量高等优势,具有较大的应用潜力。最典型的红外分时型偏振成像系统采用高精度电机以启停模式旋转起偏器,通

过重复多次采集图像计算其平均值来提升精度,这种方法的偏振成像帧率较低,通常需要几十秒钟产生一幅偏振图像,近年来研究人员通过提升分时型成像帧率逐渐弥补该缺点。Gogler考虑了电子卷帘快门产生的伪影问题,研究电机连续旋转的信号处理方式,提升系统成像帧率到5.45 Hz<sup>[10-11]</sup>。张哲使用迭代排序方式计算偏振图像,使偏振帧率提升到与红外图像帧率相等,该系统的偏振帧率达到15 Hz<sup>[12]</sup>。杨敏综合电机连续旋转方式和图像迭代排序计算方式提升偏振成像速度,使得离线计算的偏振帧率为45 Hz,并用该系统实现了对车辆等物体的偏振成像,但未测试其系统的偏振精度性能<sup>[13]</sup>。

目前,分时型红外偏振成像系统的研究主要集中在提高成像速率,而在提升偏振响应稳定性方面的研究较少,而在对动态目标检测的过程中,偏振响应的稳定输出十分重要,在系统实现高偏振帧率的同时,也需要成像系统保持较高精度和稳定的偏振响应。面向低小慢目标探测需求,本文研制由紧凑型前端采集装置和上位机组成的高帧率分时型长波红外偏振成像系统;提出建立角度误差模型,通过参数寻优验证三角度采样策略下的最佳步进角度;并提出时变参数型卡尔曼滤波算法,通过抑制系统内同步时延误差造成的偏振响应波动提升偏振响应稳定性;最后对系统的偏振响应稳定性和精度进行实验验证,在城市建筑背景环境下基于本系统完成无人机目标的偏振成像实验。

## 2 基本原理

### 2.1 Stokes 矢量计算

根据斯托克斯的研究,采用 $I, Q, U, V$  4个参量可以描述一束偏振光,其中 $I$ 表示光强信息, $Q$ 和 $U$ 表示线偏振信息, $V$ 表示圆偏振信息。不过,一般自然环境中圆偏振值较低可以忽略不

计,因此 Stokes 矢量可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}. \quad (1)$$

当入射光通过线偏振器件时,出射光的偏振态也随之改变,该物理过程可由下式表达:

$$S_{out} = MS_{in}, \quad (2)$$

式中: $S_{in}$ 为入射光的 Stokes 矢量, $S_{out}$ 为透射后的 Stokes 矢量, $M$ 为线偏振器件的穆勒矩阵,由以下公式表示:

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中方位角  $\theta$  为偏振片与偏振坐标系参考轴夹角。由于探测器仅获得响应光强参数,这里取穆勒矩阵第一行参与计算:

$$I_{out} = \frac{1}{2} (I_{in} + Q_{in} \cos(2\theta) + U_{in} \sin(2\theta)), \quad (4)$$

式中: $I_{out}$ 可通过光电传感器采集光强信号, $\theta$ 可通过角度传感器或预设信息得到角度信息。因此为了解出  $I_{out}$ ,  $Q_{out}$ ,  $U_{out}$  3 个未知数,一般需要采集 3 次以上不同角度下穆勒矩阵调制后的独立测量光强信息组成的线性方程组,才可解出入射光 Stokes 矢量。

由于自然界光束一般为偏振态与非偏振态的叠加,因此,为了描述偏振光部分在总光强中的占比以及偏振态的偏振优势方向角,分别提出偏振度(DOLP)和偏振角(AOP)两个指标:

$$x_{DOLP} = \sqrt{(Q^2 + U^2)} / I, \quad (5)$$

$$x_{AOP} = \arctan(U/Q) / 2. \quad (6)$$

## 2.2 偏振成像系统

由于本系统面向的是无人机目标探测,该目标具有低小慢动态运动特性,为了实现动态物体的探测,需要实现 50 Hz 的偏振成像帧率,并在保持高帧率成像的同时确保具有较好的偏振响应精度。系统由前端采集装置和上位机两部分组成。其中,前端采集装置采用分时型偏振成像系统架构,红外机芯以 50 Hz 帧率采集红外图像,高速电机以 500 r/min 转速带动偏振片旋转并在每

次采集图像后上传当前角度,上位机对 3 次采集数据根据 2.1 部分的解算方法解算后输出一张偏振图像,当有新的采集数据后,以迭代的方式将最新数据替换掉最早的采集数据,最终以 50 Hz 帧率输出偏振图像。其工作时序如图 1 所示。

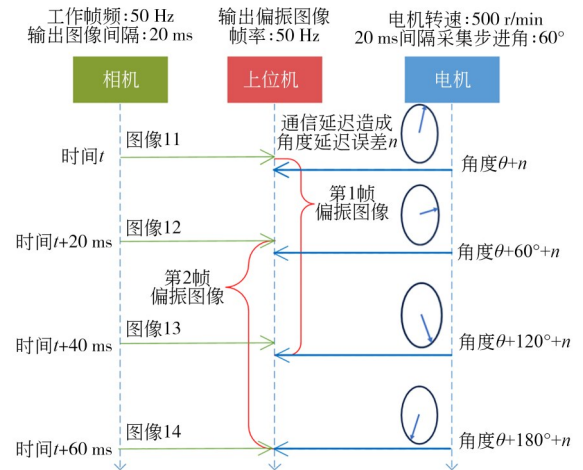


图 1 成像系统工作时序

Fig. 1 Working timing of imaging system

其中,红外相机采用艾睿光电公司生产的 Xcore MicroIII Lite 红外机芯;偏振片采用 Thorlabs 公司生产的长波红外线栅偏振片;电机采用机致科技公司的中空电机,该电机为绝对值编码器,可使每次断电重启后基准角度相同。为减小高速旋转引起的机械振动,所有装置固定于 3D 打印支架中,整个前端采集装置尺寸为 80 mm × 90 mm × 60 mm,质量为 800 g,前端采集装置实物如图 2 所示。

系统工作时,首先在上位机中设置电机转速,然后通过串口数据发送到角度同步采集装置后转为 CAN 协议帧转发给电机,待电机转速达

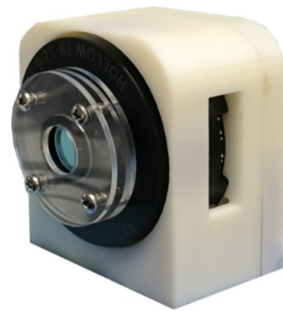


图 2 前端采集装置实物

Fig. 2 Physical drawing of front-end acquisition device

到设置转速后,红外机芯开始以 50 Hz 帧率上传图像数据流,每完成一帧图像采集,上位机就会向电机发送查询信号,电机随即返回当前转速、角度等信息。上位机在接收到一帧图像和一帧电机信息后,存入 FIFO 缓存中,即完成了一帧数据采集。当采集超过 3 帧数据后,上位机启动图像解算程序,图像解算程序为 3 个独立线程,通过流水线形式解算方式以提升成像帧率,实现在线输出帧率达到 50 Hz。

### 3 红外偏振成像系统的关键技术

#### 3.1 偏振最优步进角分析

由 2.1 节可知,采集 3 次不同角度的光强信息即可实现偏振矢量的解算,但是三角度的选取与最终成像的精度有着较大关联。在理想的偏振成像系统中,基于信息熵和仿生学理论认为当检偏器采用步进角为  $60^\circ$  的三角度采样策略时,系统能够实现最优的偏振信息提取效率<sup>[14-15]</sup>。然而,在实际工程应用中,偏振片的实际取向角不可避免地会出现误差,这种角度偏移误差对传统最优步进角理论的适用性提出了挑战,因此需要研究当系统中存在角度误差时的最优步进角。

设一束非完全偏振光线入射检偏器前光强为  $I_{in}$ ,其偏振度为  $d$ 。根据马吕斯定律:线偏振光通过检偏器后的透射光强会受到偏振光振动方向和检偏器透光轴方向夹角  $\varphi$  的影响。假设检偏器对无偏光的透射率为 50%,则原始光线透射检偏器后的透射光强可以表示为:

$$I(\varphi) = I_{in}(1-d)/2 + I_{in}d \cos^2(\varphi). \quad (7)$$

设每次采集的角度间隔为  $\theta$ ,每次采集系统可以同时获取到光强信息和检偏器角度信息,假设采集到的光强信息和角度信息准确无误,Stokes 矢量  $S_{correct}$  为:

$$S_{correct} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi \\ 1 & \cos 2(\varphi + \theta) & \sin 2(\varphi + \theta) \\ 1 & \cos 2(\varphi + 2\theta) & \sin 2(\varphi + 2\theta) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I(\varphi) \\ I(\varphi + \theta) \\ I(\varphi + 2\theta) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

而在实际情况中,电机的高速旋转使得角度采集误差不可忽略,采集到角度信息会出现随机

误差。设角度采集误差为  $n$ ,代入误差项后的 Stokes 矢量  $S_{error}$  为:

$$S_{error} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2(\varphi + n) & \sin 2(\varphi + n) \\ 1 & \cos 2(\varphi + \theta) & \sin 2(\varphi + \theta) \\ 1 & \cos 2(\varphi + 2\theta) & \sin 2(\varphi + 2\theta) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I(\varphi) \\ I(\varphi + \theta) \\ I(\varphi + 2\theta) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

此时,使用带有角度采集误差的  $S_{error}$  计算出的偏振度与  $S_{correct}$  计算出的偏振度之差即为不同步进角度时的偏振度误差。由于步进角度可以设计为任何值,而且该值会影响系统精度,在角度误差存在的情况下,不同的步进角度所得到的偏振精度也不同,因此需要研究步进角度  $\theta$  对偏振解算的影响。

设入射光偏振度为 0.4,角度采集误差  $n$  为  $0.5^\circ$ ,以采样步进角  $\theta$  为变量,分别设采样步进角为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ,代入式(8)和式(9)进行偏振度解算,探寻存在角度采集误差时不同步进角对偏振解算误差的影响。计算结果如图 3 所示。

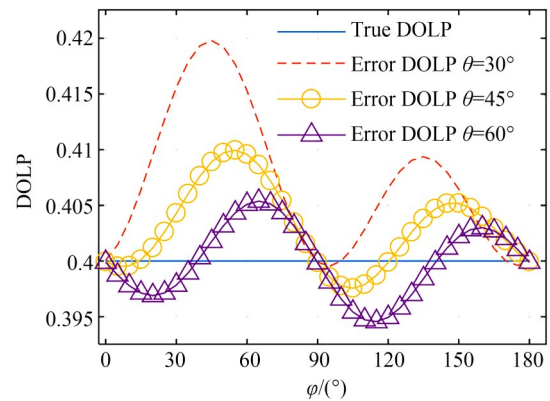


图 3 不同条件下解算出的偏振度结果

Fig. 3 Results of degree of polarization calculated under different conditions

图 3 中,true DOLP 是由  $S_{correct}$  计算出的真实偏振度,不同的步进角和方位角其值恒为 0.4,这验证了仿真方法的正确性;而其他 error DOLP 是由不同  $\theta$  所得的  $S_{error}$  计算出的结果,其值在 0.4 附近上下波动,即由加入角度采集误差后的 Stokes 矢量计算出的偏振度也出现了误差,且波动值偏离真值越远表示在该步进角度  $\theta$  下偏振度误差越

大。由以上仿真结果可以发现,相同角度误差  $n$  导致的偏振度误差会随着步进角的不同而变化。具体来说,步进角为  $30^\circ$  时偏振度误差最大,  $45^\circ$  时误差次之,  $60^\circ$  误差最小。以上结果说明,不同步进角参数在相同角度测量误差的情况下,计算出的偏振度误差也不同。为了得到最优步进角,令步进角从  $0^\circ$  变化到  $180^\circ$  进行遍历仿真寻优,结果如图 4 所示。

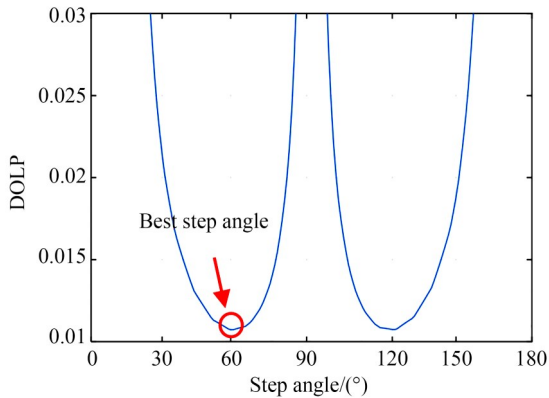


图 4 基于偏振度误差的步进角寻优结果

Fig. 4 Step angle optimization results based on polarization error

仿真数据表明,由角度同步误差引发的偏振度解算误差在  $0^\circ$  至  $60^\circ$  步进角区间内为单调递减,这是由于在较大角度间隔上减小了误差角度在 Stokes 矢量计算中的误差权重。系统在步进角度达到  $60^\circ$  时获得最低偏振度误差极值,这验证了经典三角度采样理论在存在实际误差条件下的有效性。偏振度误差曲线在步进角大于  $60^\circ$  后出现反转上升趋势,该现象是由于步进角度分布的过度稀疏导致偏振解算误差增加。其中,步进角在  $90^\circ$  至  $180^\circ$  区间形成与  $0^\circ$  至  $90^\circ$  近乎对称的误差分布模式。虽然  $120^\circ$  步进角可达到与  $60^\circ$  相近的理论误差值,但实现该参数在 50 Hz 成像帧率下需将电机转速提升至 1 000 r/min,这将导致系统功耗增加且机械振动幅值增大。从工程实践层面考虑,最终选定  $60^\circ$  作为最优步进角参数。

### 3.2 自适应检偏角度估计算法

在理想工作状态下,分时型偏振成像系统要求红外相机与电机保持精确同步,以实现电机和偏振片组成的检偏器角度信息与图像数据的同步采集。但实际中,由于系统内部之间通信延迟

等因素的影响,这种同步采集往往很难实现,且延迟时间无法准确估计,这种情况称之为同步时延。尤其在高帧率工作状态下,要求电机以 500 r/min 转速工作,配合红外相机 50 Hz 采集帧率,在两帧采集间隔时间内实现步进  $60^\circ$  的偏振片旋转,此时同步时延会放大角度的不确定性,从而导致后续偏振解算结果出现明显的波动。因此,在 50 Hz 快速成像过程中保持偏振响应的稳定,关键在于图像采集瞬间高转速检偏器的准确估计角度信息。

传统卡尔曼滤波算法尽管能够通过状态预测与测量更新的迭代过程实现角度最优估计,但其线性高斯假设并不符合实际系统的非线性噪声特性。本系统的偏振片角度观测噪声呈现明显的脉冲特性与非高斯分布,若强行沿用固定噪声协方差参数将导致滤波器增益失配。因此提出时变参数型卡尔曼滤波算法,引入电机实时运行状态参数进行动态噪声建模,通过在线监测相邻采样周期的角度步进量计算其与预设旋转量的偏离程度,动态调整观测噪声协方差矩阵的权重系数;并且依据转速反馈信号与目标值的偏差量自适应调整过程噪声协方差。

设状态变量  $x_k$  为时间步  $k$  时电机角度,状态方程可表示为:

$$x_k = x_{k-1} + \omega_{k-1}T + n_k, \quad (10)$$

式中:  $x_{k-1}$  为时间步  $k-1$  的电机角度,  $T$  为采样间隔,  $\omega_{k-1}$  为时间步  $k-1$  时的转速,  $n_k$  为过程噪声。设其协方差  $Q_k$  为时变参数:

$$Q_k = |\omega_k - \omega_{\text{set}}|, \quad (11)$$

式中:  $\omega_{\text{set}}$  为预设转速,通过测量转速和预设转速差值可自适应调整过程噪声协方差。测量模型表示为:

$$z_k = x_k + m_k, \quad (12)$$

式中:  $z_k$  为测量角度值,  $m_k$  为测量噪声,其协方差  $R_k$  为时变参数:

$$R_k = C|(z_k - z_{k-1}) - \Delta\theta_{\text{set}}|, \quad (13)$$

式中:  $\Delta\theta_{\text{set}}$  表示预设步进角度,该值通过预设的转速和相机成像帧率确定;  $C$  为常数,用于统一该时刻测量转速和测量角度步进速率之间的量纲,这里测量角度步进速率指采样时间内测量角度步进值。该式通过测量角度步进值与预设步进角度之间的差值自适应调整测量噪声协方差。

根据以上建模,所得时变参数型卡尔曼滤波算法的时间步的状态预测值  $\hat{x}_{k|k-1}$  为:

$$\hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1|k-1} + \omega_{k-1}T, \quad (14)$$

式中:  $\hat{x}_{k-1|k-1}$  代表时间步  $k-1$  的滤波结果,误差协方差预测结果  $P_{k|k-1}$  为:

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_k, \quad (15)$$

式中  $P_{k-1|k-1}$  代表时间步  $k-1$  的误差协方差。卡尔曼增益  $K_k$  为:

$$K_k = P_{k|k-1}(P_{k|k-1} + R_k)^{-1}. \quad (16)$$

状态最优估计  $\hat{x}_{k|k}$  为:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - \hat{x}_{k|k-1}). \quad (17)$$

噪声协方差最优估计  $P_{k|k}$  为:

$$P_{k|k} = (I - K_k)P_{k|k-1}. \quad (18)$$

设置初始值后,每次获得测量值都通过以上公式迭代滤波,其中  $Q_k$  和  $R_k$  在每次迭代时都会根据测量值和预设值实时调整自身的大小。当同步时误差过大时,测量角度步进值与预设角度步进值的差值会变大,测量噪声协方差也会增大,模型估计结果会倾向于状态估计值而减小测量值影响,从而实现自适应抑制同步时延导致的角度测量误差,为后续偏振解算提供更准确的检偏器角度信息。

## 4 实 验

### 4.1 偏振响应稳定性测试

为了验证时变参数型卡尔曼滤波算法对系统偏振响应稳定性的增强效果,设计了偏振度稳定性成像测试实验。实验中,以高偏振度物体作为观测对象,采用黑体作为无偏辐射源,并固定红外偏振片在光路中作为起偏器,对偏振区域进行偏振度成像,测试装置如图 5 所示。选用 Edmund 公司生产的长波红外偏振片,透射波长为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,消光比大于  $7\ 000:1$ ,透射率大于  $80\%$ ,黑体则选用了武汉凯尔文公司的高精度中温黑体,辐射面半径为  $10\ \text{cm}$ ,有效发射率为  $0.97$ ,温度波动小于  $0.05\ ^\circ\text{C}/10\ \text{min}$ 。

实验中设定黑体温度为  $50\ ^\circ\text{C}$ ,并等待其稳定,随后偏振成像系统以  $60^\circ$  为步进角连续采集  $1\ 000$  张偏振图像。对比了采用原始数据和滤波后数据生成的偏振度图像,偏振片中心  $10\times 10$  像素的偏振区域的偏振响应波动情况如图 6 所示。

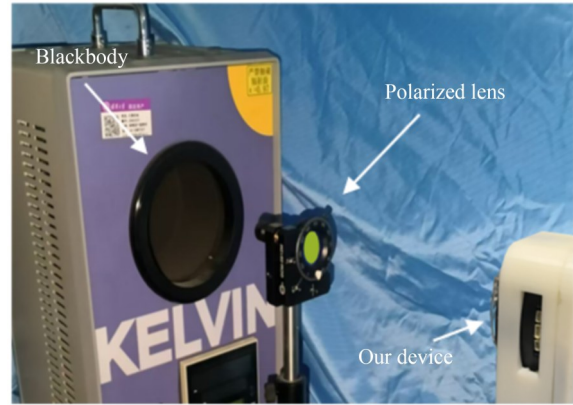


图 5 偏振度稳定性测试装置  
Fig. 5 Polarization stability test devices

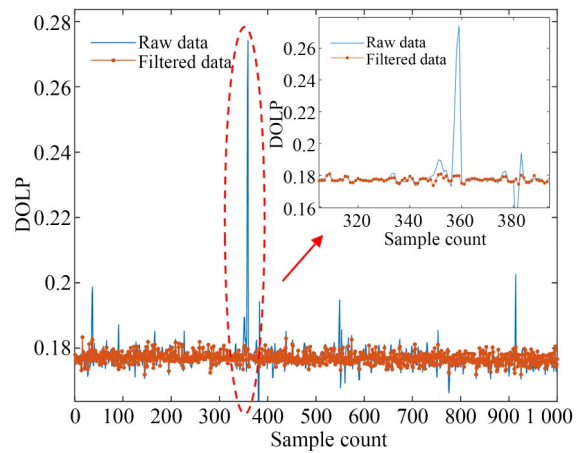


图 6 稳定性测试结果  
Fig. 6 Stability test results

测试结果表明,在较长时间的采集过程中,偏振度原始解算结果多次出现较大幅值波动,偏振度波动峰峰值达到  $0.132\ 4$ ;相对而言,采用时变参数型卡尔曼滤波算法处理后的数据显著提高了偏振响应稳定性,偏振度波动峰峰值降至  $0.011\ 5$ ,波动范围减小了  $91\%$ 。

### 4.2 偏振度精度实验

为了验证偏振度精度,采用黑体作为稳定的偏振度对象<sup>[16]</sup>,偏振成像系统测得的黑体偏振度越接近  $0$ ,表明偏振度精度越高。偏振度精度测试方式为直接对黑体偏振度成像,装置如图 7 所示。

黑体温度为  $50\ ^\circ\text{C}$ ,红外相机采集频率为  $50\ \text{Hz}$ ,采集系统正对黑体,为了验证 3.1 节的角度误差仿真中提出的最优步进角度,分别设置了  $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  的步进角度,每个步进角



图7 偏振度精度测试装置

Fig. 7 Polarization accuracy test devices

采集 100 帧偏振度图像。取黑体中心  $10 \times 10$  像素区域的偏振度作为偏振度误差,即实际偏振度与理想偏振度 0 的差值,该值越低说明偏振度精度越高。实验测试结果如图 8 所示。

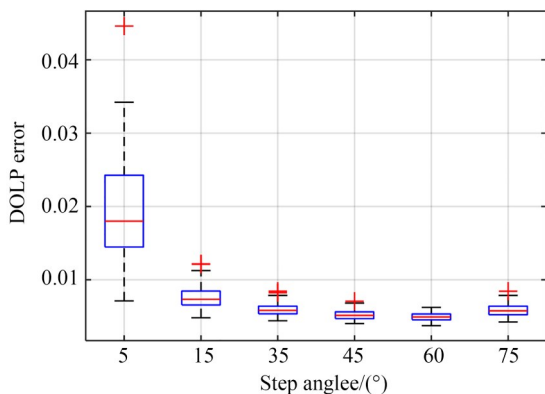


图8 偏振度精度测试结果

Fig. 8 Polarization accuracy test results

图 8 采用箱型图展示测试结果,图中十字代表离群点,箱体的扁平程度代表数据集中分布程度,箱体中心横线为该组数据中位数。结果表明,随着步进角度从  $5^\circ$  逐渐增加到  $60^\circ$ ,偏振度误差逐渐降低, $60^\circ$  达到最低,且散布最小;当角度增加为  $75^\circ$  时,偏振度误差又有所上升,这一趋势与图 4 中在步进角从  $0^\circ$  至  $90^\circ$  区间内的偏振度误差变化趋势相一致,从而验证了角度误差仿真建模的准确性。具体的步进角和偏振度误差数据如表 1 所示。实验结果表明,步进角设置为  $60^\circ$  时,本系统精度最高,偏振解析精度达  $0.50\%$ 。

表 1 偏振度精度测试结果

Tab. 1 Polarization accuracy test results

Step angle / (°)	DOLP error / %
5	1.93
15	0.76
30	0.59
45	0.52
60	0.50
75	0.58

#### 4.3 偏振角精度实验

为了验证偏振角精度进行以下测试实验:采用黑体作为辐射源,一个精密转台上固定商用偏振片作为起偏器产生特定偏振角的偏振辐射,通过对比采集到的偏振角与转台转动角度实现偏振角精度测试<sup>[17]</sup>,偏振角精度测试装置如图 9 所示。设定黑体温度为  $50^\circ\text{C}$ ,转台以  $5^\circ$  作为步进角度进行旋转,旋转 34 次,每个旋转角度采集 50 帧图像数据,对偏振片中心  $10 \times 10$  像素部分区域偏振角结果进行平均,得到该区域的偏振角采样数据,结果如图 10 所示。

横轴为转台转动角度,纵轴为系统解算出来的偏振角。由于转台旋转带动起偏器旋转,起偏器的出射光的 AOP 与转台转动角度呈线性关系且比值为 1。因此对偏振角数据进行线性拟合,所得拟合曲线斜率为 0.996,与真实值 1 相差 0.004,即偏振角在  $3\sigma$  意义下的可重复精度为  $1.52^\circ$ 。

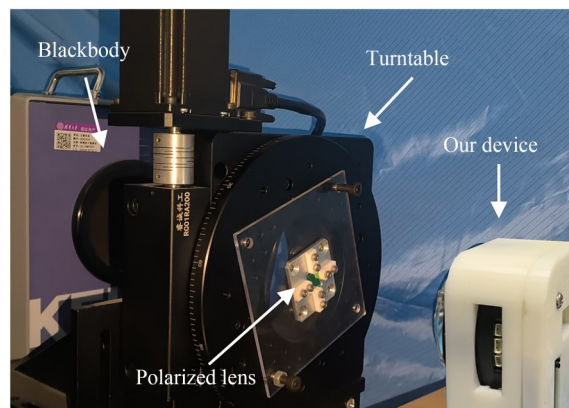


图9 偏振角精度测试装置

Fig. 9 Polarization angle accuracy test devices

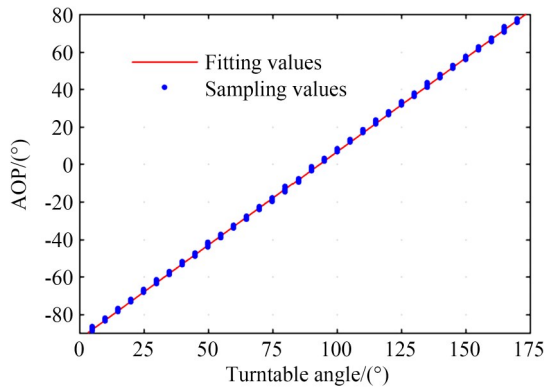


图 10 偏振角精度测试结果

Fig. 10 Polarization angle accuracy test results

#### 4.4 低小慢目标成像实验

为了验证在红外杂波淹没情况下本系统对低小慢目标探测性能,进行户外无人机成像实验。实验时间为 2024 年 12 月 18 日晚 8 点开始,天气晴,实验场地为天津市滨海区第六大街,选用大疆 Mini 4K 型号作为典型低小慢无人机目标,其质量低于 249 g,宽度为 289 mm,拍摄时无人机以 5~10 m/s 速度飞行,无人机活动范围为楼宇间空地,长 100 m、宽 40 m、高度不超过 40 m,与观察点相距 70 m。采用搭建的红外偏振

成像系统完成对无人机目标的偏振图像数据采集。

为了定量评估红外偏振图像对无人机目标探测性能的提升,分别计算红外图像和红外偏振图像中无人机目标区域的局部对比度  $C_L$ <sup>[18]</sup>,该指标通过比较目标像素值与背景像素值得到:

$$C_L = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\mu_T + \mu_B} \right|, \quad (19)$$

式中:  $\mu_T$  为目标的像素均值;  $\mu_B$  为目标区域的背景像素均值,该指标值越大,表明目标在图像中越明显。目标区域中心采用质心法定位偏振图像中的目标,目标区域大小为  $100 \times 100$  像素,目标占据像素点评判依据为偏振图中通过 Ostu 阈值分割法提取,其余部分为背景像素,完成偏振图目标点提取后在相同位置映射到红外图像中。

为了展现本系统的偏振探测能力,分别选取无人机处于天空、树木以及建筑背景下的图像帧,如图 11 所示。由图 11 可知,天空的红外辐射低于地物和无人机,天空场景中无人机目标在红外图像中表现较为明显,目标轮廓相对模糊,偏振图像中无人机偏振度较高,天空偏振度较低,

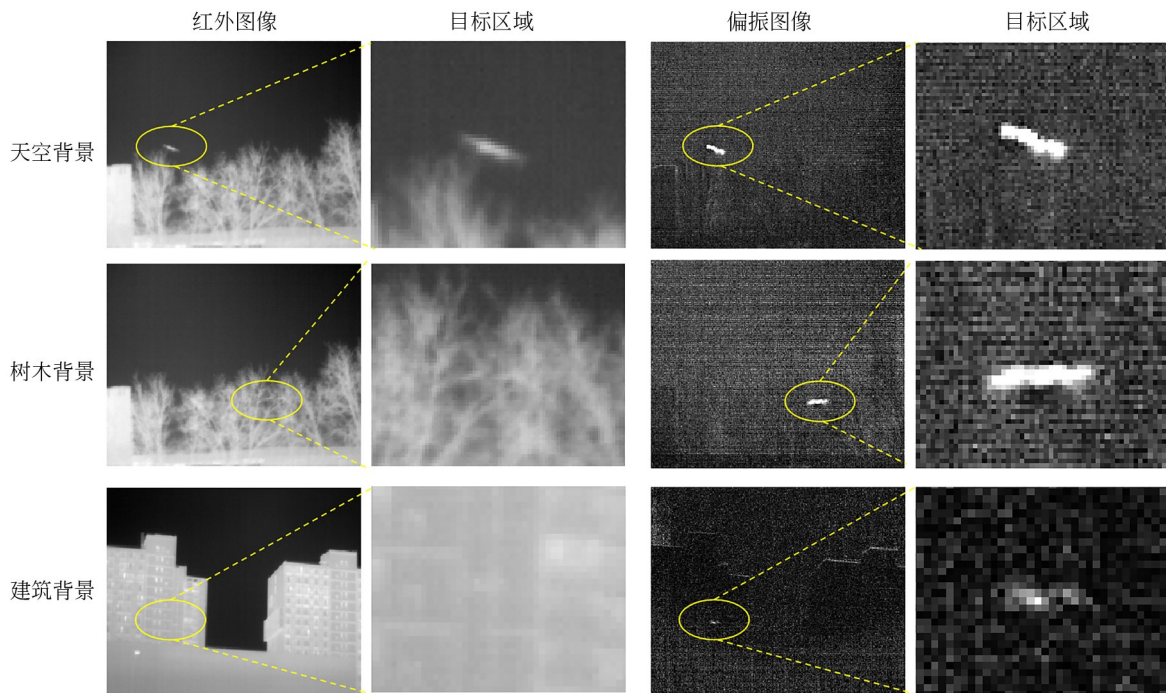


图 11 不同场景下红外图像和偏振图像对比

Fig. 11 Comparison of infrared image and polarization image in different scenes

因此无人机目标在偏振图中也较为明显,且轮廓清晰;在树木背景下,无人机红外特征受树木红外辐射影响,辨识度受限,而无人机偏振特征依旧明显,与树木背景形成明显对比;在建筑背景下,无人机红外特征被建筑红外辐射淹没,由于受到建筑背景复杂偏振度影响,因此相较于其他背景下无人机偏振特征变弱,但依旧能够有效区分目标与背景。另外,本系统基于分时型偏振成像原理,其偏振度图像是通过多帧计算合成,而且在多帧采集时间内无人机处于运动状态,与成像系统存在相对位移,从而导致偏振度图像中的无人机目标轮廓要略大于红外图像中的无人机目标轮廓,且由于运动目标存在帧间失配,使结果图中运动目标的偏振度数值失真偏高,与较低的背景偏振度相比较,其局部对比度更高。

各场景图像帧中无人机目标区域的局部对比度的计算结果如表 2 所示。由表可知,红外图像的局部对比度只有天空背景下具有较好的对比度,该场景也是传统红外的应用场景,而当目标处于树木或建筑等地物强杂波背景时,红外图像中的目标对比度较低,难以实现对无人机的探测;偏振图像的局部对比度在各场景下局部对比度都优于传统红外图像,目标在天空背景下的对比度提升了 3 倍,在强杂波背景下提升了 6~10 倍,表明该系统能在红外强杂波背景下对无人机目标实现有效检测。

#### 参考文献:

- [1] COOPER A W, LENTZ W J, WALKER P L, *et al.* Infrared polarization measurements of ship signatures and background contrast[C]. *Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds*. Orlando, FL. SPIE, 1994, 2223: 300-309.
- [2] GURTON K, FELTON M, MACK R, *et al.* MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study [C]. *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX*. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2010, 7672: 767205.
- [3] FELTON M, GURTON K P, PEZZANITI J L, *et al.* Comparison of the Inversion Periods for Mid-wave IR (MidIR) and Long-wave IR (LWIR) Polarimetric and Conventional Thermal Imagery [R].

表 2 不同场景下目标区域对比度

Tab. 2 Contrast of the target area in different scenes

场景	红外对比度	偏振对比度
天空背景	0.19	0.61
树木背景	0.09	0.58
建筑背景	0.04	0.43

## 5 结 论

本文设计了一种面向无人机目标探测的小型在线快速成像的长波红外偏振成像系统,确定了本系统的最佳步进角度参数为  $60^\circ$ ,并通过时变参数型卡尔曼滤波算法提升检偏器角度信息准确性。实验证明,在系统 50 Hz 帧频成像且电机转速为 500 r/min 转速时,该算法能够使滤波后偏振度的稳定性提升 91%,本系统的偏振度精度达到 0.50%,偏振角精度为  $1.52^\circ$ 。在户外实验中,本系统能够在红外强杂波干扰下实现无人机目标的有效检验,目标的对比度提升了至少 3 倍。相较于同类分时偏振成像系统,该系统在弥补分时型偏振成像系统的成像速率低这一短板的同时,还具有较好的稳定性和精度,为红外偏振成像系统提供了新的解决方案。

#### 作者贡献声明:

郭杰:系统搭建、实验验证及论文撰写;  
赵开春:总体框架和方案优化,校验审核。

Aberdeen: Army Resesrch Laboratory, 2010.

- [4] CREMER F, DE J W. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid anti-personnel landmines [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 1021-1032.
- [5] ARON Y, GRONAU Y. Polarization in the LWIR: a method to improve target aquisition [C]. *Infrared Technology and Applications XXXI*. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2005: 653.
- [6] RATLIFF B M, LEMASTER D A, MACK R T, *et al.* Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data [C]. *Polarization Science and Remote Sensing V*. San Diego, California, USA. SPIE, 2011, 8160: 816002.
- [7] FARLOW C A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, *et al.* Imaging polarimeter development and ap-

- plications [C]. *Polarization Analysis and Measurement IV*. San Diego, CA, USA. SPIE, 2002, 4481: 118-125.
- [8] 杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1126-1134.  
YANG B, YAN CH X, ZHANG J Q, *et al.* Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1126-1134. (in Chinese)
- [9] 马一哲, 王世勇, 雷腾, 等. 分焦平面红外偏振微扫描图像超分辨重建[J]. 光学精密工程, 2023, 31(16): 2418-2429.  
MA Y ZH, WANG SH Y, LEI T, *et al.* Superresolution reconstruction of infrared polarization microscan images in focal plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2418-2429. (in Chinese)
- [10] GOGLER S, BIESZCZAD G, SWIDERSKI J. Method of signal processing in a time-division LWIR image polarimetric sensor[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(24): 7268-7278.
- [11] GOGLER S, BIESZCZAD G, SWIDERSKI J, *et al.* Fast and accurate polarimetric calibration of infrared imaging polarimetric sensors[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(27): 8499-8512.
- [12] 张哲. 长波红外偏振成像及实验研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2019.  
ZHANG ZH. *Research on Long-Wave Infrared Polarization Imaging and Experimental Study* [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [13] 杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1511001.  
YANG M, XU W B, TIAN Y Z, *et al.* Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1511001. (in Chinese)
- [14] TYO J S. Optimum linear combination strategy for an N-channel polarization-sensitive imaging or vision system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(2): 359-366.
- [15] BERNARD G D, WEHNER R. Functional similarities between polarization vision and color vision [J]. *Vision Research*, 1977, 17(9): 1019-1028.
- [16] 汪震. 金属表面热红外偏振特性的模型研究[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 707-711.  
WANG ZH. Model of polarized thermal emission from rough metal surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 707-711. (in Chinese)
- [17] 韩勇, 赵开春, 尤政. 快速旋转式偏振成像探测装置的设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2345-2354.  
HAN Y, ZHAO K CH, YOU ZH. Development of rapid rotary polarization imaging detection devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2345-2354. (in Chinese)
- [18] 宫剑, 吕俊伟, 刘亮, 等. 红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 223-233.  
GONG J, LÜ J W, LIU L, *et al.* Adaptive scale local contrast detection for infrared polarization ship targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1): 223-233. (in Chinese)

## 作者简介:



郭 杰(1998—),男,湖北孝感人,硕士研究生,2020年于重庆邮电大学获得学士学位,主要从事红外偏振成像系统方面的研究。E-mail: 1072050774@qq.com

## 通讯作者:



赵开春(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事微纳仿生光栅器件的设计、制备与测试,仿生导航传感器的设计、构建与环境试验,微小卫星的姿态测量与控制技术方面的研究。E-mail: kaichunz@mail.tsinghua.edu.cn