

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514324

基于特征融合的全偏振超分辨率成像方法*

胡莫同¹, 潘 越¹, 刘婧怡², 张恺霖¹, 孙赛赛¹

(1. 长春理工大学光电工程学院 长春 130022; 2. 江淮前沿技术协同创新中心 合肥 230000)

摘 要:针对传统分焦面偏振相机存在空间分辨率低且无法获取完整偏振信息的固有局限性,提出并构建了一套软硬件协同的全偏振超分辨率成像系统。硬件方面,研制了一款双通道共口径全偏振相机,能够在单次曝光中同步获取低分辨率的分焦面线偏振图像和高分辨率的圆偏振图像,相较于传统的全偏振成像系统,该设计显著简化了系统结构、降低了成本与装调难度。针对该相机独特的高低分辨率混合数据结构,设计了与之配套的基于特征融合的全偏振超分辨率网络模型。该模型采用双支路架构,同时输入相机采集的两幅图像并进行特征提取,将高分辨率圆偏振图像作为精确的引导信息,通过特征融合模块实现高低分辨率特征的有效互补。为确保双支路特征对齐,在进行超分辨率重建前对两探测器采集图像进行像素级配准,确保空间位移误差 <1 pixel。引入包含物理约束的损失函数,确保了偏振角和椭圆率等角度参数重建的物理准确性,最终实现了对光强、偏振度、偏振角和椭圆率等全偏振特征的高质量重建。在真实场景数据集上,重建的 4 种偏振特征图像的峰值信噪比分别提升 0.106、0.302、0.117 和 1.085 dB;结构相似度分别提升 0.002、0.008、0.006 和 0.014。在外场探测实验中,该系统能够在复杂背景中凸显无人机目标,验证了其在目标探测领域的显著优势。

关键词: 偏振成像;全偏振图像;超分辨率;特征融合

中图分类号: TP391 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Full polarization super-resolution imaging method based on feature fusion

Hu Motong¹, Pan Yue¹, Liu Jingyi², Zhang Kailin¹, Sun Saisai¹

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Jianghuai Advance Technology Center, Hefei 230000, China)

Abstract: To address the inherent limitations of traditional division-of-focal-plane polarimeters, namely low spatial resolution and an inability to acquire complete polarization information, this paper presents a hardware-software co-designed full polarization super-resolution imaging system. On the hardware side, a dual-channel, common-aperture full polarization imaging system was developed to simultaneously capture a low-resolution division-of-focal-plane linear polarization image and a high-resolution circular polarization image in a single exposure. Compared to conventional full polarization imaging systems, this design simplifies the system architecture, reduces costs, and eases assembly and alignment. To process the unique mixed-resolution data from this camera, a complementary feature-fusion-based full polarization super-resolution network was designed. This model employs a dual-branch architecture that simultaneously processes the two captured images for feature extraction. The high-resolution circular polarization image serves as precise guidance, and a feature fusion module enables effective integration of the low-and high-resolution features. To ensure feature alignment between the two branches, pixel-level registration is performed on the images from both detectors before super-resolution reconstruction, guaranteeing a spatial displacement error of less than one pixel. A loss function incorporating physical constraints is introduced to ensure the physical accuracy of reconstructed angular parameters, such as the angle of polarization and ellipticity of polarization. This process achieves high-quality reconstruction of full polarization parameters, including intensity, degree of polarization, angle of polarization, and ellipticity of polarization. On a real-world dataset, the peak signal-to-noise ratios of the four reconstructed polarization feature images improved by

收稿日期:2025-07-26 Received Date: 2025-07-26

* 基金项目:江淮前沿技术协同创新中心追梦基金课题(2023-ZM01K004)项目资助

0.106 dB, 0.302 dB, 0.117 dB, and 1.085 dB, respectively, while the structural similarity index measure improved by 0.002, 0.008, 0.006, and 0.014. In the field exploration experiments, this system effectively identified the unmanned aerial vehicle targets in complex scenes, verifying its significant advantages in target detection.

Keywords: polarimetric imaging; full polarization images; super-resolution; feature fusion

0 引言

偏振作为光的一种基本属性,描述了光波的振动方向。在自然环境中,入射光在地表或物体表面处发生的散射过程(如镜面反射和体散射)会显著改变出射光的偏振态^[1]。目标的偏振信息与其表面粗糙度、材料特性等物理属性密切相关,为检测和识别等应用提供了强度和光谱特性之外的全新信息维度^[2]。在海洋监测中,偏振信息已被广泛应用于油膜污染识别和浮游生物检测^[3]。在大气科学中,大气偏振模型包含的信息可用于导航^[4]。此外,偏振成像在伪装目标识别^[5]、太阳耀光抑制^[6]、电池缺陷检测^[7]和零件表面检测^[8]等应用中也展现出显著优势。

与光强度信息不同,目标的偏振信息无法直接获取,需要利用多幅图像反演其偏振特征。目前的偏振成像技术中,分时型通常需要旋转偏振片或波片^[9],其旋转耗时较长且机械运动易引入误差,导致其难以对动态场景或运动目标进行精确成像。分时型主要包括分振幅^[10]、分孔径^[11]和分焦面^[12]等。分焦面偏振相机在传感器内集成微线偏振阵列,能够单次成像获取4个方向(0°、45°、90°和135°)的线偏振信息,具有结构紧凑和高帧率的优点,已成为主流的偏振成像技术。然而,分焦面相机在实际应用中存在固有的局限性。微线偏振阵列的排列方式导致其空间分辨率降低。此外,分焦面偏振相机仅能获得线偏振信息,缺少圆偏振信息导致无法反演全部偏振特征参数^[13]。

当前相关研究主要集中于通过超分辨率算法解决分焦面相机分辨率下降的问题。传统的插值方法包括双三次插值^[14]、牛顿多项式插值^[15]、残差插值^[16]和梯度插值^[17]等。这些插值方法在恢复偏振图像的高频细节方面表现不佳,且对噪声敏感。一些研究人员利用物理先验来提高偏振图像的超分辨率效果,Zhang等^[18]通过稀疏性和非局部自相似性先验增强了分焦面偏振图像的插值效果。由于分焦面偏振图像子像素交错排列的特性,不同偏振通道之间的相关性成为超分辨率的有效先验。Lu等^[19]采用邻域度量模型构造同质空间,以此分析各偏振通道间潜在的相关性。

自2014年首次提出基于深度学习的超分辨率模型以来,深度学习在超分辨率领域已不断发展并取得显著成果^[20]。一些学者将深度学习模型应用于提升偏振图

像超分辨率的视觉质量,Zeng等^[21]设计了一种端到端全卷积神经网络模型,用于直接从分焦面偏振图像重建高分辨率的线偏振特征图像。Pistellato等^[22]根据分焦面的子像素排列提出了一种由马赛克卷积组成的网络架构,以实现高精度的偏振角重建。然而,这些方法仅从低分辨率(low-resolution, LR)图像中提取特征,缺乏高分辨率(high-resolution, HR)图像的引导,从而导致偏振特征重建错误。此外,在进行全偏振图像超分辨率重建时,现有方法无法直接利用圆偏振信息。

以往的研究多集中于对分焦面相机分辨率缺失进行后处理补偿,这类解决方案受限于输入信息的物理缺失,其性能提升空间有限。为解决上述问题,本文提出基于特征融合的全偏振超分辨率成像系统。本文研制的双通道共口径全偏振相机,在保证全偏振信息获取能力的同时,简化系统结构、降低研发成本。该相机相较于分振幅型和分孔径型全偏振相机,将光路数量从4路减少至2路,为全偏振成像技术的工程化应用提供硬件基础。同时,针对该相机同步输出的高分辨率圆偏振图像与低分辨率线偏振图像这一独特数据形式,设计了配套的基于特征融合的全偏振超分辨率网络。该网络利用HR圆偏振图像作为引导,通过特征融合实现高低分辨率特征的互补,有效提升了全偏振参数的重建精度,实现包括S0光强、偏振度、偏振角和椭圆率在內的全偏振特征图像的超分辨率重建。通过真实场景的成像实验与针对人造目标的探测应用,不仅在客观指标上证明了本方法的优越性,更直观地展示了本系统在提升目标探测对比度、拓展偏振信息维度方面的实用价值。

1 特征融合全偏振超分辨率网络模型

本文提出的全偏振超分辨率网络(full polarization super-resolution network, FPSRnet)是一种端到端的网络模型,由特征提取模块、特征融合模块和全偏振重建模块这3部分组成,网络结构如图1所示。与传统超分辨率模型不同,FPSRnet同时输入两幅图像。其中,分焦面偏振图像由4个方向的线偏振像素交错排列构成。通过拆分,可得到4幅线偏振图像,其分辨率均为高分辨率圆偏振图像的1/2,如图2所示。通过特征提取模块获取高频细节信息;利用特征融合模块对不同分辨率的线偏振特征和圆偏振特征进行融合互补;最后通过重建模块进行上采样,生成全部偏振特征图像。

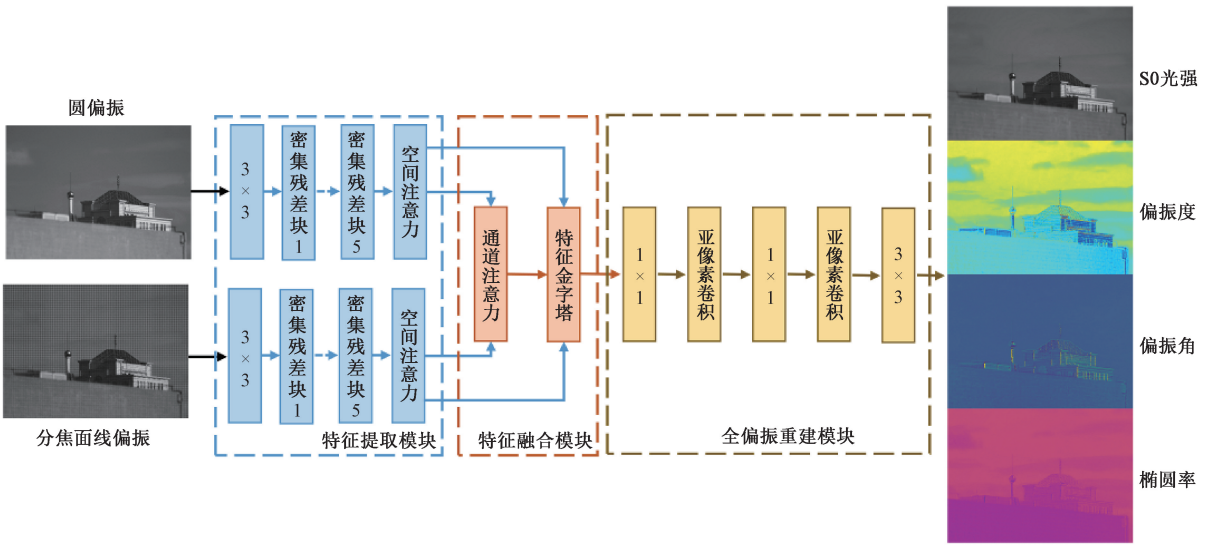


图 1 全偏振超分辨率网络结构

Fig. 1 Full polarization super-resolution network structure

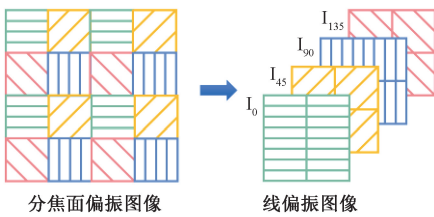


图 2 分焦面偏振图像

Fig. 2 Division of focal plane polarization image diagram

1.1 特征提取模块

特征提取模块在 FPSRnet 中采用双支路架构,用于并行处理分焦面偏振图像和圆偏振图像。初始步长为 2 的 3×3 卷积层用于从原始输入中提取浅层特征,同时降低分辨率以提高计算效率。5 个连续的密集残差块(residual dense blocks, RDBs)用于进一步提取深层特征。RDB 的结构如图 3 所示。每个 RDB 包含 4 个以线性整流函数(rectified linear unit, ReLU)为激活函数的卷积层,其密集残差连接确保输出特征在保留浅层细节的同时集成深层语义信息。RDB 最后的 1×1 卷积层用于通道压缩,从而减少冗余信息。

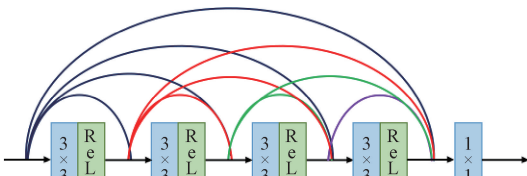


图 3 密集残差块

Fig. 3 Residual dense block

在进行特征融合前,使用空间注意力进一步增强双支路提取的特征,使得模型能够在空间维度动态关注重要特征。对输入特征图 $F \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ 在通道维度上逐像素进行最大池化和均值池化,即:

$$F_{\max}(i, j) = \text{MaxPool}(F(i, j)), F_{\max} \in \mathbb{R}^{1 \times H \times W} \quad (1)$$

$$F_{\text{avg}}(i, j) = \text{AvgPool}(F(i, j)), F_{\text{avg}} \in \mathbb{R}^{1 \times H \times W} \quad (2)$$

将池化结果沿通道连接,得到从两个角度聚合的空间信息,即:

$$F_{\text{concat}} = [F_{\max}; F_{\text{avg}}], F_{\text{concat}} \in \mathbb{R}^{2 \times H \times W} \quad (3)$$

最后利用一个 3×3 卷积层和 sigmoid 激活函数得到空间注意力图。将该空间注意力图与原始特征进行逐像素相乘,以突出重要空间区域,同时抑制不重要的区域。

FPSRnet 的缩放因子由输入的 HR 圆偏振图像相对于线偏振图像的倍率决定,因此可以通过修改特征提取模块中卷积核的尺寸和步长,实现对不同缩放因子超分辨率需求的适应。本文展示的是缩放因子为 2 倍的超分辨率重建场景。

1.2 特征融合模块

传统的特征金字塔仅对单一输入图像提取的特征进行融合,没有考虑多模态特征的差异性,且简单的特征拼接或相加无法充分利用不同特征的互补信息。因此,本文结合通道注意力与特征金字塔,通过动态权重分配,使特征金字塔具有模态感知能力,实现了圆偏振与线偏振特征的自适应特征互补。如图 4 所示,分别对圆偏振特征和分焦面特征进行全局平均池化。然后通过两个全连接层对通道进行降维和扩展,并通过 Sigmoid 函数生成通道权重。对完成动态加权的特征图像分别进行 2 倍下采样和 4 倍下采样,以获取高频细节信息;然后通过双线性

插值恢复特征图尺寸;最后将不同尺度的特征进行通道连接,并通过 3×3 卷积层平滑融合结果。融合特征同时包含HR圆偏振信息和LR线偏振信息,为全偏振特征重建奠定基础;通道注意力能够根据输入特征图不同进行自适应调制,使特征融合模块具有更强的鲁棒性,并提高FPSRnet在真实场景数据集中的重建效果。

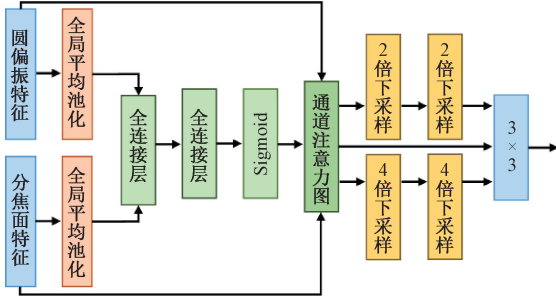


图4 特征融合模块

Fig.4 Feature fusion module

1.3 全偏振重建模块

全偏振特征图像重建通过分阶段的亚像素卷积实现,与直接上采样相比,这种逐步恢复的上采样方法表现出更佳的可学习性,能够逐步恢复细节,同时有效减轻高倍率上采样引起的伪影。S0输出不设置激活函数;偏振度(degree of polarization, DoP)输出使用Sigmoid激活函数,用于限制输出结果在 $[0, 1]$ 区间;偏振角(angle of polarization, AoP)和椭圆率(ellipticity of polarization, EoP)为角度值,分别选择 \arctan 和 \arcsin 作为输出层的激活函数。

1.4 损失函数

与其他超分辨率任务不同,FPSRnet直接重建偏振特性参数图像。物理约束损失函数对于确保偏振特性参数重建的准确性至关重要。FPSRnet的损失函数包括两个部分:基础损失函数和物理约束损失函数。基础损失函数可以计算为:

$$Loss_{basic} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{SR} - I_{HR}| + \lambda Loss_{SSIM} \quad (4)$$

其中, $Loss_{basic}$ 的第1项表示 L_1 损失函数, N 是像素数量, I_{SR} 是超分辨率图像的像素值, I_{HR} 是真值图像的像素值;第2项是结构相似性(structural similarity, SSIM)损失, λ 为权重系数,用于平衡两项损失,针对S0、DoP、AoP和EoP的重建, λ 值分别经验性地设置为0.6、0.4、0.3和0.2。该损失用于衡量重建图像与真实高分辨率图像在结构上的相似性,可计算为:

$$Loss_{SSIM} = 1 - \frac{(2u_x u_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (5)$$

其中, x 和 y 分别代表网络重建的超分辨率图像和对

应的高分辨率真值图像, u 表示像素均值, σ_x 和 σ_y 是两幅图像的方差, σ_{xy} 是相应的协方差。

完整的偏振信息可以通过4个斯托克斯矢量来描述,可表示为:

$$S_0 = (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})/2 = I_L + I_R \quad (6)$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} \quad (7)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (8)$$

$$S_3 = I_R - I_L \quad (9)$$

其中, I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 和 I_{135} 分别表示4个不同方向的偏振分量; I_R 和 I_L 分别表示左旋和右旋圆偏振光分量; S_0 表示光强度; S_1 表示水平和垂直线偏振分量之间的差异; S_2 表示 45° 和 135° 线偏振分量之间的差异; S_3 表示左旋和右旋圆偏振之间的差异。为了进一步描述偏振信息,斯托克斯矢量可用于计算DoP、AoP和EoP,计算公式如式(10)~(12)所示。

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (10)$$

$$AoP = \arctan(S_2/S_1)/2 \quad (11)$$

$$EoP = \arcsin(S_3/S_0)/2 \quad (12)$$

这些偏振特性共同描述入射光的详细偏振信息。由于AoP的范围具有 π 周期性,这意味着 0° 和 180° 表示相同的偏振方向。直接对物理上接近的角度应用 L_1 损失可能会产生由周期性导致的误差。因此,引入式(13)中定义的损失函数来解决角度周期性问题。式(14)则用于约束EoP的绝对值在 $[0, \pi/4]$ 范围。

$$L_{AoP} = \frac{1}{N} \sum 1 - \cos(2(I_{SR-AoP} - I_{HR-AoP})) \quad (13)$$

$$L_{EoP} = \frac{1}{N} \sum ReLU\left(|I_{EoP-SR}| - \frac{\pi}{4}\right) \quad (14)$$

最终的总损失函数可表示为:

$$L_{total} = L_{basic} + 0.3L_{AoP} + 0.2L_{EoP} \quad (15)$$

其中,用于约束AoP和EoP的物理损失函数权重系数,其选择的合理性在3.4节中得到验证。

2 双通道共口径全偏振相机研制

为解决传统分焦面偏振相机在空间分辨率和偏振信息完整性上的固有缺陷,并为本文的超分辨率算法提供必需的同步HR圆偏振图像与分焦面线偏振图像,研制了一款新型双通道共口径全偏振成像系统。该系统设计的核心思想在于,通过精简的光路设计,在保证全偏振信息获取能力的同时,大幅降低传统四光路全偏振系统的复杂度、成本与装调难度。

2.1 光学系统设计与性能分析

光学系统的核心目标是在可见光波段内,为两个成像通道提供具有相同视场、高分辨率且色差与畸变得

良好校正的图像。光学系统的主要设计参数如表 1 所示。为实现双通道成像,光学系统采用 50:50 的非偏振分束棱镜将成像镜头的汇聚光束一分为二,分别进入线偏振通道和圆偏振通道。线偏振通道采用一块分焦面偏振探测器,而圆偏振通道则在标准图像探测器前放置一片厚度为 2 mm 的左旋圆偏振片。为保证两路光程的等效性,在线偏振通道中对应位置插入了一块同等厚度的 K9 平行平板玻璃用于补偿这一差异。确保了两路光束经历完全相同的光学结构,消除了非对称光路引入的差异性像差。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Optical system design parameters

参数名称	参数值
工作波段	0.44~0.66 μm
入瞳直径	$\Phi 50 \text{ mm}$
视场角	$\pm 2.6^\circ$
焦距	192.5 mm
F 数	3.85
分光棱镜尺寸	50 mm \times 50 mm \times 50 mm
像面尺寸	1.1 英寸 CMOS
分辨率	4 096 \times 3 000
像元尺寸	3.45 μm

基于设计指标,使用光学设计软件 ZEMAX 对系统进行了详细的优化。经过焦距缩放、玻璃材料替换(选用成都光明玻璃库的标准材料)和多轮优化迭代,最终得到由两组双胶合透镜组成的 5 片式主镜头结构。该结构有效校正了色差,并实现了紧凑化设计。最终的光学系统光路如图 5 所示。

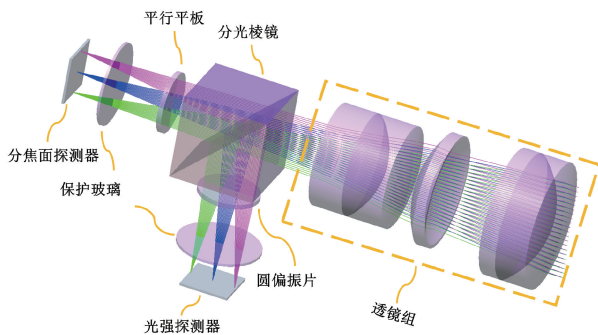


图 5 全偏振相机光路

Fig. 5 Polarization camera optical path diagram

系统的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)曲线如图 6 所示,在系统最大空间频率处(145 lp/mm),全视场光学传递函数(optical transfer

function, OTF)模值 >0.45 ,并且除了边缘视场子午方向外,其余视场均 >0.5 ,该像质表现是考虑厚度圆整之后的情况。

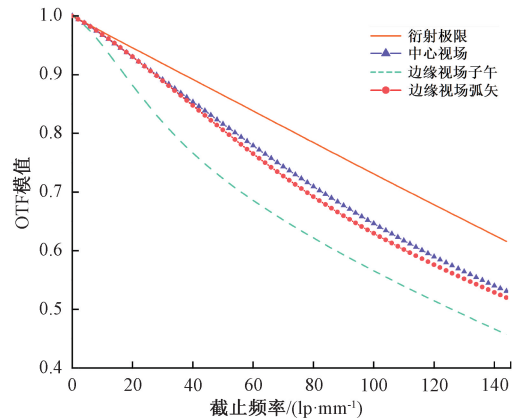


图 6 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of the optical system

得益于优化的对称性结构和双胶合透镜的应用,系统的畸变得到了极好的控制。如图 7 所示,全视场最大畸变 $<0.3\%$,在图像上几乎不可察觉,可视作为无畸变成像。

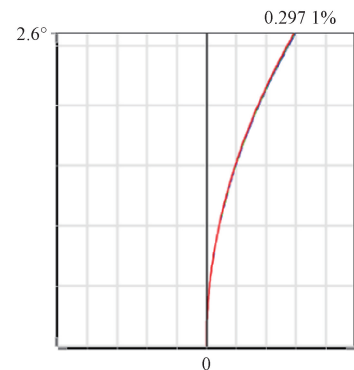


图 7 光学系统畸变

Fig. 7 Optical system distortion

2.2 光机结构设计

基于光学设计结果,实现了整机的结构设计,系统外形尺寸为 333.5 mm \times 220 mm \times 109 mm,总重 4.05 kg。图 8 展示了全偏振相机的整体结构,其采用了箱体结构设计,其中箱体外壳具备横纵两方向加强筋结构,并在箱体底部设置固定接口,与棱镜支撑结构形成刚性连接。据此将前置镜头、圆偏振片和平行平板以共基准方式集成于框架背部,形成共口径双通道系统。

图 9 展示了全偏振相机的内部光机结构。各组件均采用模块化装配策略,所有光学元件(含胶合透镜)均通过独立镜座实现高精度装配。每个镜座设有定位基准面



图8 全偏振相机样机

Fig. 8 Prototype of the full polarimetric camera

和精密螺纹接口,通过预留注胶孔进行胶合固定,同时配置压圈以形成胶层失效后的二次机械约束。其中,镜筒采用便于加工的铝合金材料,通过精密车削工艺实现光程匹配。各镜座组件在镜筒内采用台阶定位与弹性圈圈压接方式,配合棱镜模块完成圆偏振光和线偏振光的光路集成。分光棱镜通过中心镜框固定于底板,形成三面透射的光窗。其采用三点定位粘接工艺,其镜框底板设有3处精铣凸台作为硅胶粘接的基准面,辅以棱柱限位结构实现空间约束。两个探测器分别固定在L型支架上,并采用调焦环机构实现像面在光轴方向的调节。最终,依靠同步触发确保两个探测器的曝光起始误差在微秒量级,进而实现同时成像。

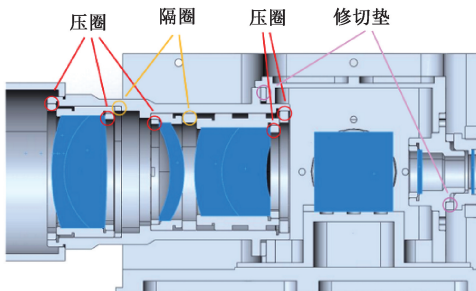


图9 透镜结构的安装策略

Fig. 9 Installation strategy for lens structure

全偏振相机同步采集的图像如图10所示,其中分焦面偏振图像受到子像素排列的影响,导致产生网格效应。通过对分焦面偏振图像间隔采样,可获得4个不同方向的线偏振图像,其分辨率降低至分焦面偏振图像和圆偏振图像的1/2。

(a) 分焦面线偏振图像
(a) Division-of-focal-plane linear polarization image(b) 圆偏振图像
(b) Circular polarization image

图10 全偏振相机采集的图像

Fig. 10 Images captured by the full polarimetric camera

3 实验结果与分析

3.1 图像配准

全偏振相机在装调过程中不可避免地会产生校准误差,导致采集的分焦面偏振图像和圆偏振图像之间存在空间偏移,使得斯托克斯矢量的计算结果存在误差,进而降低偏振特征图像的反演精度。采用尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)算法对采集的两组图像进行配准。利用SIFT提取特征点并计算单应矩阵。计算结果表明,两个探测器间的差异主要表现为 X/Y 方向的平移误差,旋转和缩放分量极小,可以忽略不计。因此,单应矩阵在 X/Y 方向的平移分量被视为平移误差并进行相应补偿。配准前后分焦面偏振图像和圆偏振图像在 X/Y 方向的平移误差分布如图11所示。配准前,两组图像之间的平移误差主要在3~6 pixels。配准前, X 方向的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为5.335 pixels,在 Y 方向为4.725 pixels。配准后,97%的图像平移误差 < 1 pixel。重新计算的MAE在 X 方向为0.725 pixels,在 Y 方向为0.646 pixels。误差分布证实,配准后的图像能够确保进行点对点的斯托克斯矢量计算。对于固定的光学系统,采用相机标定技术预先校正两路光路的空间位移是一种更根本、更稳健的方法,尤其适用于工业化量产的仪器。在本文中展示的是实验室原型机,且采集的场景大多包含足够的纹理特征,SIFT算法能够有效地提取匹配点并计算出稳定的变换矩阵。配准后误差分布如图11所示,残余误差已降低至亚像素级别,满足了后续斯托克斯矢量计算和超分辨率算法验证的精度要求。在未来的工作中将集成硬件标定流程以进一步优化系统。

3.2 实验设置

本文实验的硬件环境为 NVIDIA GeForce RTX 4090 GPU, i9-14900k CPU 和 96 GB RAM。模型在 PyTorch 上

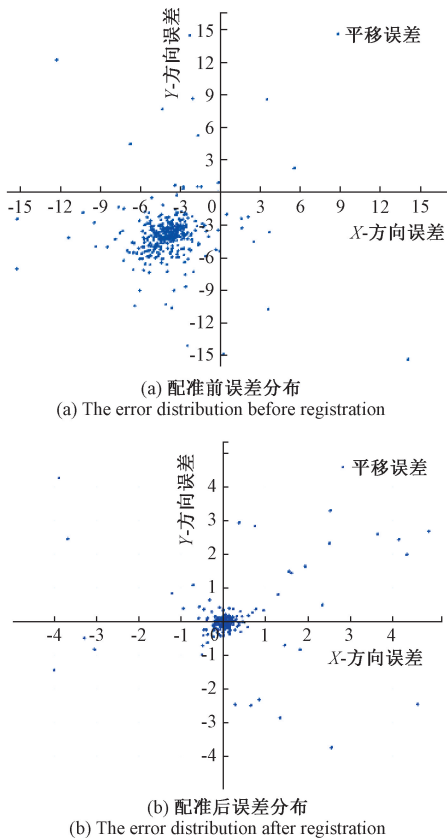


图 11 配准误差分布对比

Fig. 11 Registration error distribution comparison

实现,训练数据集包含 5 000 对分焦面偏振图像和圆偏振图像。在训练阶段,输入图像尺寸调整为 256×256 ,使用适应性矩估计(adaptive moment estimation, adam)优化器,批(batch)大小为 8,并训练 100 个周期(epoch)。初始学习率设置为 1×10^{-4} ,优化器的权重衰减系数为 1×10^{-4} ,以防止过拟合。采用余弦退火方法调整学习率,使其从 1×10^{-4} 逐渐衰减到 1×10^{-7} 。

3.3 实验结果

为了验证本文提出的 FPSRnet 的超分辨率性能,本文将其他超分辨率方法在定量指标和视觉质量评估方面进行对比实验。对比算法包括 3 种偏振图像超分辨率模型:偏振去马赛克卷积网络(polarization demosaicing convolutional network, PDCNN^[23])、偏振超分辨率网络(polarization super resolution network, PSRNet^[24])和分支网络 Forknet^[21]; 2 种单图像超分辨率模型:超分辨率卷积神经网络(super resolution convolutional neural network, SRCNN^[25])和增强型超分辨率生成对抗网络(enhanced super resolution generative adversarial network, ESRGAN^[26])以及 1 种传统插值方法: Bicubic^[14]。PDCNN、PSRNet 和 Forknet 仅能对线偏振特征进行超分

分辨率重建,不能直接重建 DoP 和 EoP。因此,PSRNet 和 Forknet 根据超分辨率结果计算 S1 和 S2, PDCNN 直接输出 S1 和 S2, 然后进一步计算获得全偏振特性图像。SRCNN 和 ESRGAN 则对分焦面偏振图像拆分获得的 4 组线偏振图像进行超分辨率重建,然后计算相应的全偏振特征图像。为了定量评估每种方法超分辨率结果的质量,采用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和 SSIM 作为评价指标。

不同方法重建的 S0、DoP、AoP 和 EoP 图像的对比结果分别如图 12~15 所示,图中场景由本文研制的全偏振相机采集。FPSRnet 在真实场景下利用 HR 输入图像的重建结果在减少 S0 图像模糊方面表现出色。S0 图像通过简单的线性叠加获得。相比之下,DoP、AoP 和 EoP 图像涉及基于斯托克斯参数的非线性计算,因此噪声水平更高。

在 DoP 图像中,本文方法能够重建最完整的建筑边缘细节,并且能更好地区分前景树木与背景建筑的细节。Bicubic 方法中偏振细节缺失严重;ESRGAN 对于金属铁塔的细节重建效果更好;而 Forknet 和 SRCNN 受噪声影响较为明显。对于 AoP 图像, Bicubic 和 SRCNN 显示出显著的噪声干扰。现有方法尽管有效抑制了噪声,但以牺牲高频细节为代价,导致建筑结构边缘模糊并产生伪影。本文方法在实现一定程度噪声抑制的同时,最大程度地保留了边缘细节。关于 EoP 图像,现有方法在重建过程中未能整合圆偏振特征,导致大量细节丢失。相比之下,本文方法保留了最高水平的高频分量,并最佳地保持建筑元素的结构清晰度。

表 2 提供了这些指标在不同方法之间的全面比较。所提出的 FPSRNet 在全偏振特征参数图像的重建质量方面表现出卓越的性能,在 PSNR 和 SSIM 指标方面均达到了最先进的水平。其中,PSNR 分别提升 0.106、0.302、0.117 和 1.085 dB; SSIM 分别提升 0.002、0.008、0.006 和 0.014。Bicubic 作为传统插值方法,具有最低的 PSNR 和 SSIM,这表明基于插值的方法在恢复高频细节方面存在固有的局限性。在基于深度学习的方法中,专为偏振图像超分辨率设计的 PSRNet、PDCNN 和 Forknet 在重建 DoP 和 AoP 参数方面优于 SRCNN 和 ESRGAN。然而,由于受限于高分辨率特征缺失,其性能仍低于本文提出的 FPSRnet。此外,由于 EoP 的计算仅依赖于 S0 和圆偏振图像,导致所有方法在 EoP 上的重建性能均优于 DoP 和 AoP。而本文的方法在重建过程中同时充分利用了圆偏振和线偏振特征,因此在 EoP 重建中表现突出。

为了进一步验证所研制的全偏振相机在实际应用中的价值,本文设计了一个针对人造目标(无人机)的探测实验。使用研制的全偏振相机在城市建筑背景下对一架小型无人机进行成像。基于采集到的数据,分别计算了

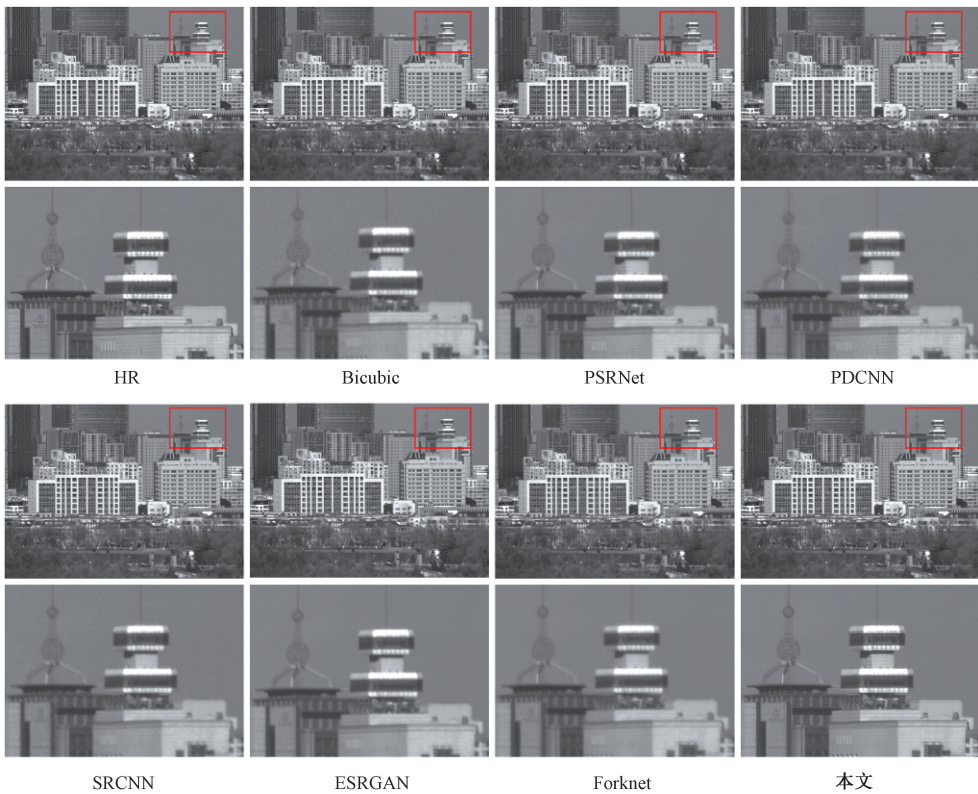


图 12 真实场景 S0 图像重建效果对比

Fig. 12 Comparison of S0 image reconstruction results in the real scene

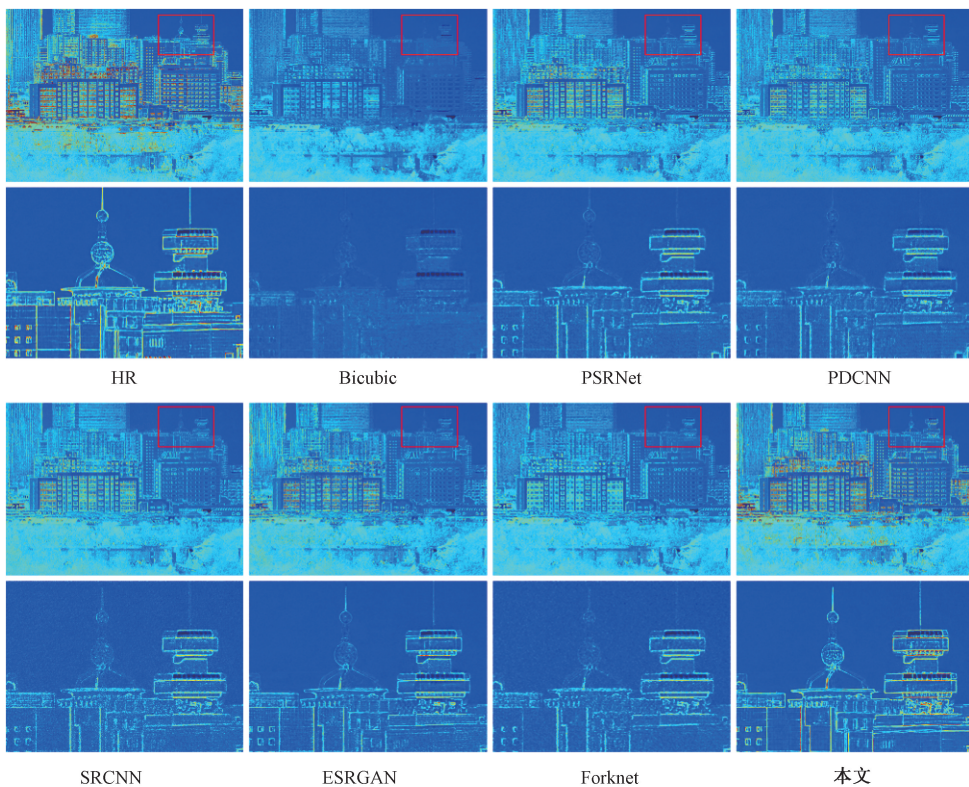


图 13 真实场景 DoP 图像重建效果对比

Fig. 13 Comparison of DoP image reconstruction results in the real scene

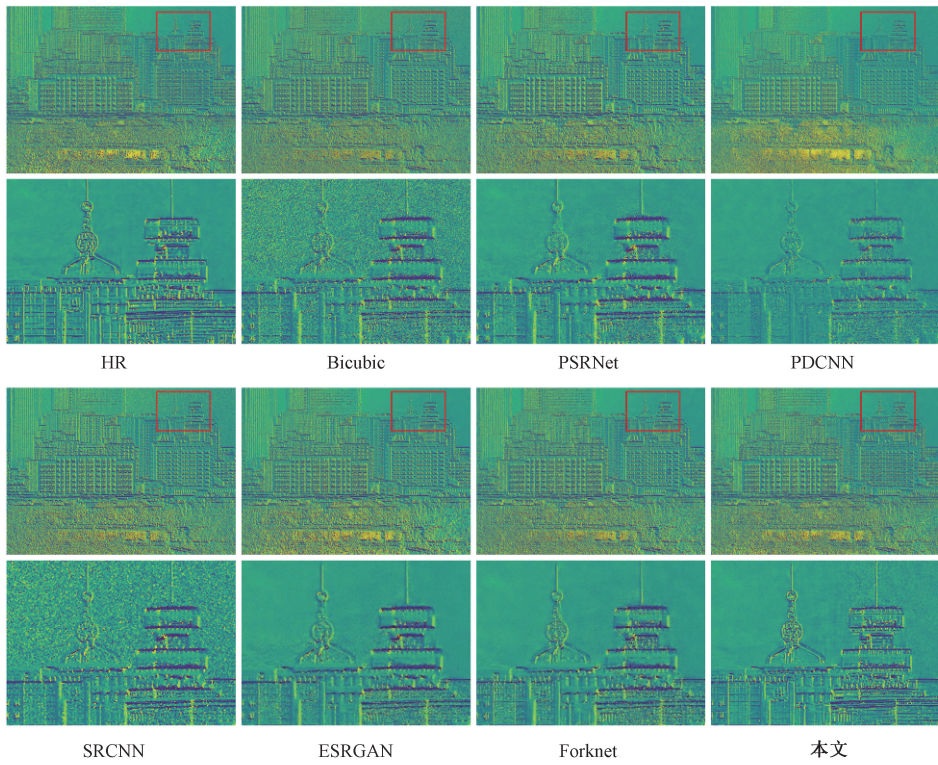


图 14 真实场景 AoP 图像重建效果对比

Fig. 14 Comparison of AoP image reconstruction results in the real scene

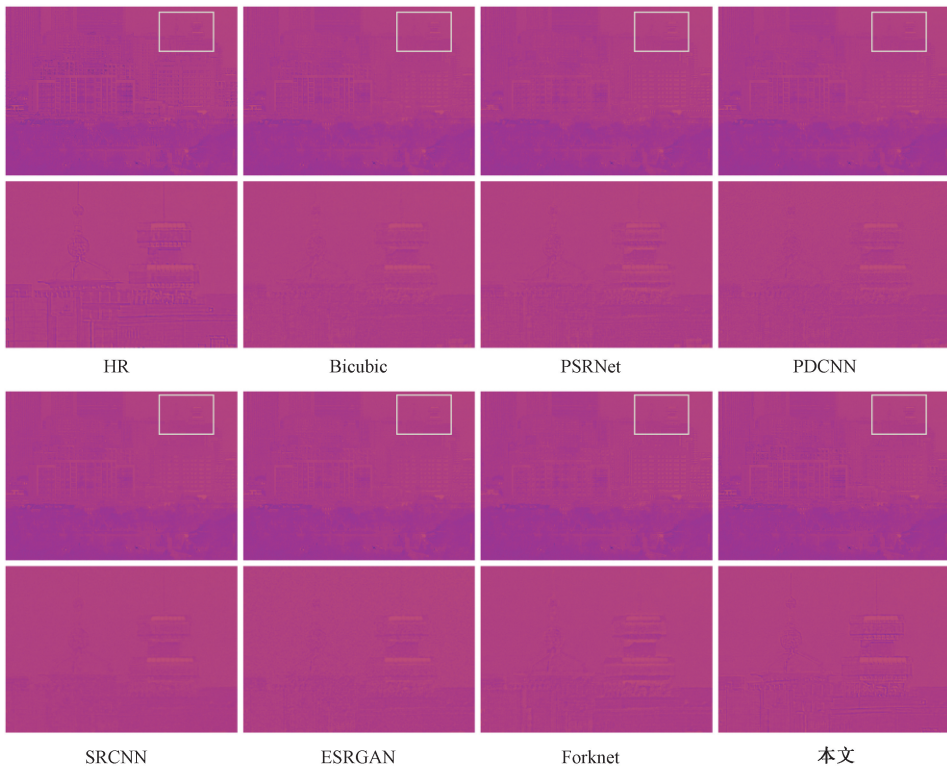


图 15 真实场景 EoP 图像重建效果对比

Fig. 15 Comparison of EoP image reconstruction results in the real scene

表2 各超分辨率方法的 PSNR 和 SSIM 对比

Table 2 Comparison of PSNR and SSIM of each super-resolution methods

方法	S0		DoP		AoP		EoP	
	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM
Bicubic	35.438	0.895	18.572	0.497	10.634	0.310	23.923	0.705
PSRNet	40.241	0.923	23.632	0.679	12.885	0.374	25.741	0.825
PDCNN	38.670	0.904	22.037	0.693	12.072	0.353	26.790	0.801
Forknet	39.682	0.914	21.329	0.676	11.935	0.378	26.937	0.866
SRCNN	37.489	0.903	21.273	0.659	11.437	0.327	24.514	0.827
ESRGAN	37.827	0.912	21.180	0.664	11.992	0.341	25.735	0.846
本文	40.347	0.925	23.934	0.701	13.002	0.384	28.022	0.880

线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP) 图像和全偏振度 (DoP) 图像。实验结果如图 16 所示。

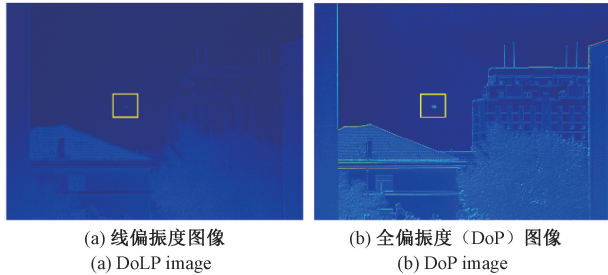


图 16 全偏振信息在无人机探测中的应用对比

Fig. 16 Comparison of the application of full polarization information in unmanned aerial vehicle detection

图 16(a) 的 DoLP 图像中, 无人机目标的偏振特征与其所处的背景天空区域差异不明显, 导致目标与背景的

对比度极低, 无人机几乎被淹没, 难以通过自动或人工方式进行有效识别。在图 16(b) 的 DoP 图像中, 无人机作为一个高亮度的目标从背景中凸显出来, 其与背景的对比度得到显著提升。原因在于无人机表面涂层材料在反射阳光时产生的圆偏振分量被 DoLP 的计算所忽略, 而本文研制的全偏振相机能够精确测量 S3 分量, 并通过计算全偏振度 DoP, 将这一隐藏的特征维度转化为可见的、高对比度的图像。

3.4 消融实验

为验证 FPSRnet 各模块的有效性, 本文进行消融实验。所有模型均在相同的条件下进行训练测试, 定量评估结果如表 3 所示。完整的 FPSRnet 作为 M4 模型, M1 模型将 HR 圆偏振输入替换为 LR 输入, 其他结构不变; M2 模型将特征融合模块替换为简单的拼接和 1×1 卷积; M3 模型移除物理约束损失函数, 只使用基础损失函数 $Loss_{basic}$ 。

表3 消融实验量化结果

Table 3 Quantitative results of ablation studies

方法	S0		DoP		AoP		EoP	
	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM
M1	37.974	0.905	21.327	0.625	11.571	0.341	24.709	0.830
M2	40.315	0.920	23.890	0.692	12.875	0.372	27.864	0.869
M3	39.552	0.906	22.358	0.636	11.944	0.346	24.852	0.841
M4	40.347	0.925	23.934	0.701	13.002	0.384	28.022	0.880

由于 M1 模型完全缺乏 HR 信息输入, 其重建结果大幅下降。M2 模型表明简单的通道叠加无法充分利用不同特征之间的互补性; M3 模型则验证了物理约束的必要性。M4 则在所有指标上均取得了最佳性能, 这表明本文提出的双支路引导架构和物理约束损失两大创新点是互补的, 使得 FPSRnet 能够实现当前最优的全偏振图像超

分辨率重建效果。

除了验证模型结构外, 本文还对损失函数中各部分的权重进行了敏感性分析, 以证明超参数选择的合理性。由于 AoP 和 EoP 的结果为角度值, 具有周期性和边界性, 使得传统的线性距离损失函数失效, 因此对 AoP 和 EoP 进行物理约束。不同权重系数的 AoP 和 EoP 的评

评价指标变化如图 17 所示,其中 EoP 的重建效果受权重系数影响较小,在 0.2~0.4 范围均具有较高的 PSNR 和 SSIM, AoP 在权重系数较大时重建图像的评价指标则有大幅下降,因此,综合考虑各参数的重建性能,最终选择 0.2 和 0.3 分别作为 AoP 和 EoP 的物理约束权重。

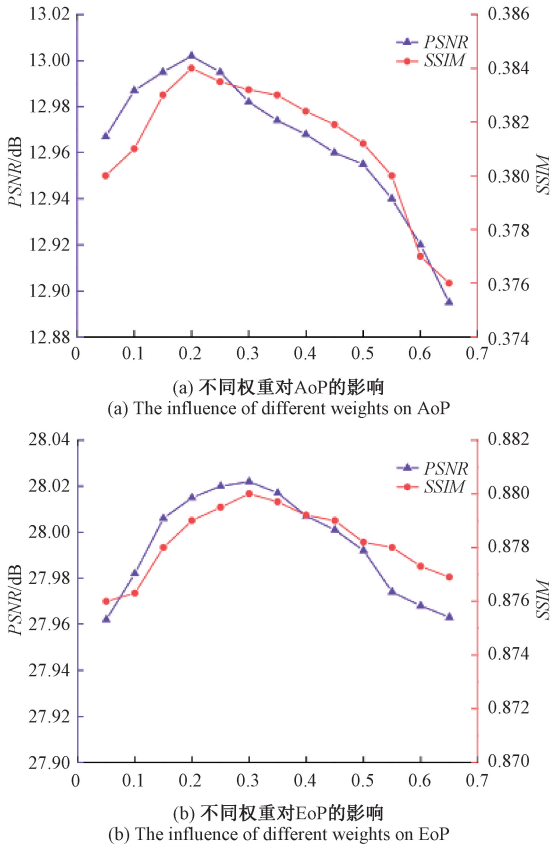


图 17 物理约束权重对评价指标的影响

Fig. 17 The impact of physical constraint weights on evaluation indicators

4 结 论

本文成功研制并验证了一套软硬件协同的全偏振超分辨率成像系统,有效解决了传统偏振成像技术中空间分辨率、信息完整性与系统复杂度之间的固有矛盾。所研制的双通道共口径全偏振相机,以更低的系统复杂度实现了全偏振信息的同步获取。配套 FPSRne 模型则充分利用了相机输出的全偏振数据,通过特征融合与物理约束,将硬件获取的高分辨率先验信息有效传递至最终的偏振特征图像重建中,有效缓解了“先重建、后计算”这一传统流程中的误差累积。实验结果表明,本系统在 PSNR 和 SSIM 等客观评价指标上显著优于现有方法。对无人机目标的探测实验直观展示了本系统的应用价值:通过获取完整的圆偏振信息,系统在提升目标与背景

对比度方面表现出巨大优势,验证了全偏振信息在目标探测中的重要性。未来的工作将聚焦于系统的工程化与小型化研究,并探索其在工业表面缺陷检测、生物组织病变识别、遥感伪装目标探测等精密测量领域的应用潜力,以期将全偏振成像的独特优势转化为更广泛的实用技术。

参考文献

- [1] 胡浩丰, 黄一钊, 朱震, 等. 基于深度学习复杂环境的偏振成像技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 9-26.
HU H F, HUANG Y ZH, ZHU ZH, et al. Research progress on polarimetric imaging technology in complex environments based on deep learning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(3): 9-26.
- [2] 韩浩, 何赞泽, 杜旭, 等. 基于偏振信息图像增强的多目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 29-38.
HAN H, HE Y Z, DU X, et al. Multi-object detection based on polarization information image enhancement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 29-38.
- [3] 潘雨薇, 陈晶晶, 孙亮, 等. 多角度偏振成像仪的海洋场景定标与水色反演[J]. 光学学报, 2024, 44(18): 1-11.
PAN Y W, CHEN J J, SUN L, et al. Ocean sites calibration and water color retrieval for directional polarimetric camera[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(18): 1-11.
- [4] 鲍昌皓, 高欣健, 王文莉, 等. 结合高频感知的大气偏振模式生成方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 18-26.
BAO CH H, GAO X J, WANG W L, et al. Atmospheric polarization mode generation method based on high-frequency perception[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 18-26.
- [5] 沈英, 黄伟达, 周则兵, 等. 基于特征波段偏振成像的差分增强伪装目标检测[J]. 兵工学报, 2024, 45(10): 3488-3498.
SHEN Y, HUANG W D, ZHOU Z B, et al. Contrast enhancement for camouflage target detection based on feature band polarization imaging[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(10): 3488-3498.
- [6] 张聪立, 周俊焯, 纵园, 等. 基于偏振信息的海面太阳耀光抑制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(15): 2181-2192.

- ZHANG C L, ZHOU J ZH, ZONG Y, et al. Sun glint suppression from sea surface based on polarization information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(15): 2181-2192.
- [7] 汪方斌, 张彦福, 王峰, 等. 光伏电池电致发光偏振图像融合与缺陷检测[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(19): 143-149.
- WANG F B, ZHANG Y F, WANG F, et al. Photovoltaic cell electroluminescence polarization image fusion and defect detection [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(19): 143-149.
- [8] 杨长虎, 袁东, 张健, 等. 基于偏振特征与强度信息融合的工件目标检测[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(24): 188-196.
- YANG CH H, YUAN D, ZHANG J, et al. Workpiece target detection based on fusion of polarization features and intensity information [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(24): 188-196.
- [9] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2345-2354.
- [10] 殷玉龙, 孙晓兵, 宋茂新, 等. 分振幅型全 Stokes 同时偏振成像系统波片相位延迟误差分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(2): 102-114.
- YIN Y L, SUN X B, SONG M X, et al. Phase delay error analysis of wave plate of division-of-amplitude full Stokes simultaneous polarization imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(2): 102-114.
- [11] 孙昇, 王超, 史浩东, 等. 分孔径离轴同时偏振超分辨率成像光学系统像差校正[J]. *物理学报*, 2022, 71(21): 165-176.
- SUN SH, WANG CH, SHI H D, et al. Aberration correction of aperture-divided off-axis simultaneous polarization super-resolution imaging optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(21): 165-176.
- [12] 聂安然, 裘桢炜, 孙晓兵, 等. 分焦面偏振探测器的串扰研究[J]. *光学学报*, 2025, 45(5): 22-31.
- NIE AN R, QIU ZH W, SUN X B, et al. Crosstalk of division of focal plane polarization detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(5): 22-31.
- [13] 董祉序, 杨澍, 郭仁杰, 等. 空间调制型偏振成像的滤波器带宽优化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(8): 207-217.
- DONG ZH X, YANG SH, GUO R J, et al. Optimization of optimal filter bandwidth for spatially modulated full polarization imaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(8): 207-217.
- [14] 马岩, 张超子, 刘也, 等. 采用双三次插值的空间目标偏振成像[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- MA Y, ZHANG CH Z, LIU Y, et al. Polarization imaging of space target based on bicubic interpolation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- [15] LI N, ZHAO Y Q, PAN Q, et al. Demosaicking DoFP images using Newton's polynomial interpolation and polarization difference model [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1376-1391.
- [16] AHMED A, ZHAO X J, GRUEV V, et al. Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10651-10662.
- [17] GAO SH K, GRUEV V. Gradient-based interpolation method for division-of-focal-plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1137-1151.
- [18] ZHANG J CH, LUO H B, LIANG R G, et al. Sparse representation-based demosaicing method for microgrid polarimeter imagery [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3265-3268.
- [19] LU Y, REN W H, SU Y M, et al. Polarization image demosaicing based on homogeneity space [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 178: 108179.
- [20] 程德强, 陈杰, 寇旗旗, 等. 融合层次特征和注意力机制的轻量化矿井图像超分辨率重建方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(8): 73-84.
- CHENG D Q, CHEN J, KOU Q Q, et al. Lightweight super-resolution reconstruction method based on hierarchical features fusion and attention mechanism for mine image [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(8): 73-84.
- [21] ZENG X L, LUO Y, ZHAO X J, et al. An end-to-end fully-convolutional neural network for division of focal plane sensors to reconstruct S0, DoLP, and AoP [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8566-8577.
- [22] PISTELLATO M, BERGAMASCO F, FATIMA T, et al. Deep demosaicing for polarimetric filter array cameras [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2022, 31: 2017-2026.

- [23] ZHANG J CH, SHAO J B, LUO H B, et al. Learning a convolutional demosaicing network for microgrid polarimeter imagery[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4534-4537.
- [24] HU H F, YANG SH Y, LI X B, et al. Polarized image super-resolution via a deep convolutional neural network[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 8535-8547.
- [25] DONG CH, LOY C C, HE K M, et al. Learning a deep convolutional network for image super-resolution [C]. *European Conference on Computer Vision*, 2014, 8692: 184-199.
- [26] WANG X T, YU K, WU SH X, et al. ESRGAN: Enhanced super-resolution generative adversarial networks[C]. *European Conference on Computer Vision*, 2019, 11133: 63-79.

作者简介



胡莫同, 2019年、2023年于长春理工大学获得学士学位、硕士学位, 现为长春理工大学博士研究生, 主要研究方向为偏振成像技术及图像处理。

E-mail: hmt@mails.cust.edu.cn

Hu Motong received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Changchun University of Science and Technology in 2019 and 2023, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Changchun University of Science

and Technology. His main research interests include polarimetric imaging technology and image processing.



潘越(通信作者), 2012年、2017年于长春理工大学获得学士学位、博士学位, 现为长春理工大学教授, 主要研究方向为光电检测技术及光学半实物仿真。

E-mail: panyue@cust.edu.cn

Pan Yue (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Changchun University of Science and Technology in 2012 and 2017, respectively. He is currently a professor at Changchun University of Science and Technology. His main research interests include photoelectric detecting technique and optical semi-physical simulation.



刘婧怡, 2021年于合肥师范学院获得学士学位, 2024年于长春理工大学获得硕士学位, 现为江淮前沿技术协同创新中心质量工程师, 主要研究方向为激光光谱气体检测。

E-mail: 377324527@qq.com

Liu Jingyi received her B. Sc. degree from Hefei Normal University in 2021, and her M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2024. She is currently a quality engineer at Jianghuai advance technology center. Her main research interest includes laser spectroscopy gas detection.