

文章编号 1004-924X(2026)08-1203-16

机载快照多光谱与热红外多维光学吊舱 设计与应用探索

赵宇博^{1,2}, 占杰^{1,2}, 吕昊³, 刘晓煌⁴, 于涛^{1*}, 胡炳樑¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术研究室, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 空军军医大学 军事生物医学工程学系, 陕西 西安 710032;

4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室,
北京 100055)

摘要:面向机载遥感多模态协同探测需求,设计并实现了一种集成快照多光谱与热红外成像能力的多维光学吊舱系统。系统采用像元级马赛克滤光快照多光谱成像体制,通过双相机协同设计构建18个可见—近红外离散光谱通道,光谱范围覆盖480~600 nm与650~800 nm两个区间;采用3×3像元级马赛克采样结构,在2×2像元合并条件下,单通道有效分辨率可达680×510,等效像元尺寸为6.8 μm,可实现多光谱视频级获取。同时集成热红外成像载荷,实现多源数据的同步采集。针对多源异构数据,构建了几何配准、光谱特征扩增、主成分分析降维与无监督K-means聚类相结合的数据处理流程,并将热红外信息引入主成分特征空间以增强地物可分性。实验结果表明,多光谱通道中心波长与设计值一致性良好,光谱带宽约为中心波长的2%,辐射定标线性拟合相关系数均接近1,系统响应稳定可靠。在典型应用中,融合热红外信息后可有效提升水体边界完整性、植株检测统计有效性及地物分类精度,两类代表性场景的交并比分别提升2.7%和6.6%,Dice系数分别提升1.7%和4.5%。结果表明,该多模态光学吊舱在自然资源调查与生态环境监测中具有良好的应用潜力。

关键词:机载遥感;多模态协同探测;光学吊舱;快照多光谱;像元级马赛克;热成像;地物分类

中图分类号:TH743;V241 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263408.1203

CSTR:32169.14.OPE.20263408.1203

Design and application exploration of an airborne snapshot multispectral and thermal infrared multidimensional optical pod

ZHAO Yubo^{1,2}, ZHAN Jie^{1,2}, LÜ Hao³, LIU Xiaohuang⁴, YU Tao^{1*}, HU Bingliang¹

(1. Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Military Biomedical Engineering, Air Force Medical University,
Xi'an 710032, China;

收稿日期:2026-01-30;修订日期:2026-03-03.

基金项目:自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放基金(No. 2025261);西安光学精密机械研究所自主部署项目(No. S24-030-III);空军军医大学伙伴实验室合作交流计划(No. 2024HB018)

4. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements,
Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey,
Beijing 100055, China)

* Corresponding author, E-mail: yutao@opt. ac. cn

Abstract: A multidimensional optical pod integrating snapshot multispectral and thermal infrared imaging was designed and implemented to meet the demand for airborne remote sensing with multimodal cooperative detection. The system adopted a pixel-level mosaic filter-based snapshot multispectral imaging scheme. Through a dual-camera cooperative configuration, 18 discrete visible-near-infrared spectral channels were constructed, covering two spectral ranges of 480~600 nm and 650~800 nm. A 3×3 pixel-level mosaic sampling structure was employed. Under a 2×2 pixel binning strategy, the effective single-channel spatial resolution reached 680×510 , with an equivalent pixel size of $6.8 \mu\text{m}$, enabling video-rate multispectral acquisition. A thermal infrared imaging payload was synchronously integrated to achieve simultaneous multi-source data acquisition. For heterogeneous multimodal data, a processing framework combining geometric registration, spectral feature augmentation, principal component analysis-based dimensionality reduction, and unsupervised K-means clustering was established. Thermal infrared information was further introduced into the principal component feature space to enhance land-cover separability. Experimental results show that the center wavelengths of the multispectral channels agree well with the design values, with bandwidths of approximately 2% of the center wavelengths. Radiometric calibration exhibits near-unity linear fitting coefficients, indicating stable and reliable system response. In representative applications, the fusion of thermal infrared information effectively improves water boundary integrity, vegetation detection statistics, and land-cover classification performance. The intersection-over-union (IoU) increases by 2.7% and 6.6%, and the Dice coefficient increases by 1.7% and 4.5% in two typical scenarios. These results demonstrate that the proposed multimodal optical pod has strong potential for natural resource surveys and ecological environment monitoring.

Key words: airborne remote sensing; multimodal cooperative detection; optical pod; snapshot multispectral imaging; pixel-level mosaic; thermal imaging; land-cover classification

1 引言

随着对地观测技术的快速发展,航空遥感因具备机动性强、部署灵活等优势,已成为连接高精度地面观测与大尺度卫星遥感的重要技术手段^[1-2],在自然资源调查、生态环境监测、灾害应急响应及国防安全等领域发挥着不可替代的作用。作为航空遥感系统的核心载体,机载光学吊舱通过集成多类光学传感器,实现对地表目标多维信息的获取,其性能直接决定了遥感数据的质量与应用深度。

单一模态的观测数据难以全面刻画复杂地物属性,例如,仅依赖宽带可见光影像难以有效区分具有相似外观但光谱响应差异显著的地物

类型,也难以识别早期植被胁迫等细微变化^[3];而仅基于热红外成像虽可反映目标的热辐射分布,却难以提供材料组成与地表覆盖类型所对应的光谱判别信息^[4]。因此,将多光谱反射信息与热红外辐射信息进行融合,实现对目标在空间—光谱—辐射多维属性的协同感知,是提升机载遥感系统综合探测能力的重要发展方向^[5-7]。

在工程实践中,机载光学观测系统已逐步由单一信息获取向多模态集成发展,例如大疆 H30T 等载荷通过集成高清可见光与热红外成像模块^[8],在应急巡查和态势感知等场景中展现出良好的实用性。然而,此类系统以宽带可见光成像为主,缺乏窄带多光谱解析能力,难以满足精细光谱分析需求。相对而言,多光谱成像载荷如

长光禹辰公司的MS600系列通常面向遥感应应用专门设计^[9],能够获取离散波段反射信息,但光谱通道较少,且未集成热红外成像模块。美国MicaSense公司的Altum PT是少数被报道实现多光谱与热红外同步获取的系统之一^[7,10],但其多光谱通道数量仅为5个,镜头不可更换,且热红外成像分辨率仅为 320×256 ,在复杂场景和高精度应用中能力欠缺。

相较于摆扫/推扫式等光谱成像体制,快照(Snapshot)多光谱成像能够在单次曝光内同时获取空间与光谱信息^[11-12],显著降低了对搭载平台姿态稳定性与运动速度控制精度的要求,因而特别适合部署于机载等动态平台,实现视频级多维信息的同步获取,并可用于探测动态目标。目前多采用多镜头多相机方案^[12-13],通过硬触发实现多通道快照同步采集,以提升光谱覆盖能力,但系统结构冗余,且对多视场配准提出更高要求。相比之下,基于像元级马赛克滤光片的快照多光谱体制将分光结构堆叠集成于探测器层面,具有结构紧凑、光路简单、易于集成等工程优势^[13-15]。欧洲微电子研究中心(Interuniversity Micro-Electronics Center, IMEC)是最早开展片上马赛克多光谱阵列研究的机构之一^[16],该技术已逐渐成为面向机载应用的重要发展路线。

基于上述背景,本文面向机载遥感多模态协同探测需求,设计并实现了一种集成快照多光谱与热红外成像能力的多维光学吊舱系统,并围绕系统工程实现与典型应用开展了系统验证与方法探索。首先,在系统架构层面提出快照多光谱与热红外一体化集成的机载光学吊舱方案,实现多源信息的同步获取与协同观测;其次,在器件实现方面采用双相机协同的像元级马赛克滤光设计,实现18个可见-近红外离散波段的快照成像,并建立了滤光片制备、封装对准与系统定标的完整可复用工程实现流程;进一步,在应用方法层面构建了多光谱-热红外联合的数据处理与分析流程,包括几何配准、光谱特征扩增、主成分分析降维以及无监督K-means聚类,并将其应用于典型地物分类任务。野外飞行实验结果表明,多模态信息融合能够有效提升水域边界识别、植被目标检测统计以及地物精细分类能力。相关研究可为新一代机载多模态光学遥感系统的工

程实现与应用拓展提供有益参考。

2 吊舱系统设计

2.1 快照多光谱载荷

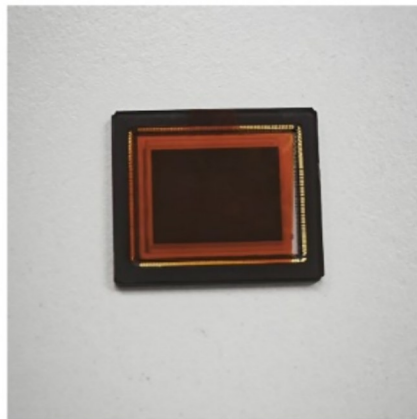
2.1.1 CMOS选型与像元级马赛克滤光片制备

综合成像速度、空间分辨率、光谱响应特性及工艺兼容性等因素,本研究选用长光辰芯公司的GMAX3412型CMOS图像传感器作为核心探测器(如图1(a)所示)。该器件采用全局快门结构,能够有效避免滚动快门引起的几何畸变,满足视频级快照多光谱成像对时间同步性和动态场景适应性的要求。其靶面尺寸为1.1英寸,对应分辨率为 $4\,096 \times 3\,072$,在像元合并及马赛克多光谱体制引入空间降采样后,仍可保持较高的有效空间分辨率,为自然资源监测与目标探测提供充足的空间细节信息。

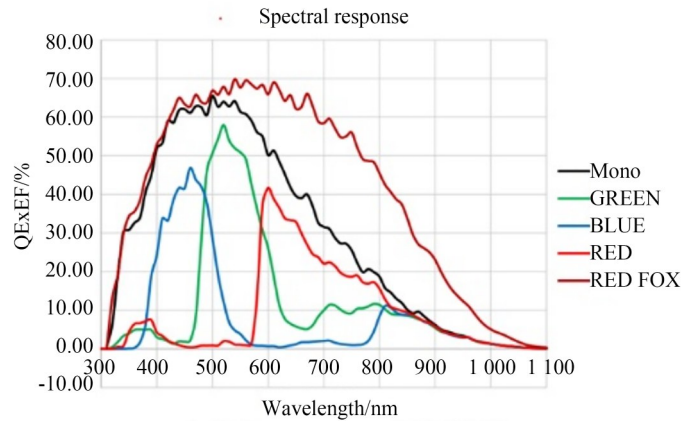
得益于Red Fox增强工艺,GMAX3412在可见光至近红外波段均表现出优良的光电转换能力,其在540 nm处的峰值量子效率可达75%,在850 nm处仍保持约33%的量子效率(如图1(b)所示),有效弥补了传统CMOS在长波段响应不足的问题。这一特性使其在红光、红边及近红外波段的多光谱成像应用中具有明显优势。

像元级马赛克滤光片采用基于法布里-珀罗(Fabry-Pérot)腔结构的干涉滤光工艺实现,通过精确控制腔内多层介质薄膜的厚度与折射率,实现不同中心波长窄带通道的构建。在具体实现上,像元级分光膜系可优先镀制于独立光学基底上,通过多次光刻与薄膜沉积工艺在基底表面形成具有周期性排列特征的滤光阵列结构,每个滤光单元对应单一中心波长。受限于现有微纳薄膜沉积与光刻对准工艺水平,单个滤光片的最小可制备尺寸仍难以直接与所选探测器的 $3.4\ \mu\text{m}$ 像元实现一一对应。为此,本研究使用 2×2 像元合并策略,使等效像元尺寸提升至 $6.8\ \mu\text{m}$,从而与当前工艺条件下可稳定制备的最小滤光单元尺寸相匹配,同时提高了系统信噪比。

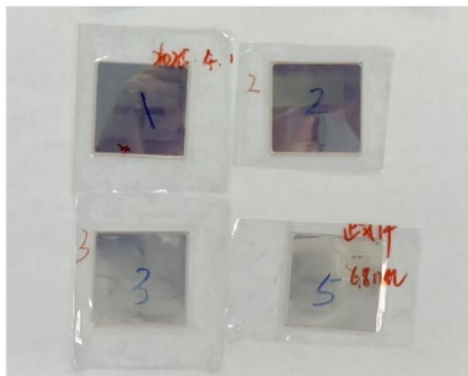
在此基础上,综合空间分辨率、光谱通道数量及系统实现复杂度等因素,最终选取 3×3 周期的像元级马赛克滤光片排布结构。考虑到法布



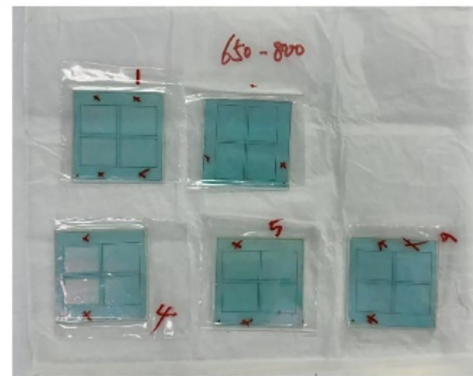
(a) GMAX3412 芯片
(a) GMAX3412 sensor



(b) 芯片量子效率曲线
(b) Sensor quantum efficiency curve



(c) 可见光像元级马赛克滤光片
(c) Visible-light pixel-level mosaic filter



(d) 近红外像元级马赛克滤光片
(d) Near-infrared pixel-level mosaic filter

图1 CMOS选型与滤光片制备

Fig. 1 CMOS selection and filter preparation

里一珀罗腔滤光片在通带宽度控制及高阶干涉抑制方面的工艺约束,单台相机难以实现宽波段高质量覆盖,因此采用双相机协同设计方案。考虑到应用导向的波段配置,最终将光谱范围划分为480~600 nm与650~800 nm两个子区间,其中可见光波段用于表征目标的颜色与反射特性,红边及近红外波段对植被、水体及典型人造目标具有更强的光谱判别能力,同时有效避免了长波通道的通带外次峰对短波通道产生串扰。

两类像元级马赛克滤光片制备实物如图1(c)和图1(d)所示,每类滤光片均包含9个离散光谱通道,两者合并后共形成18个波段,覆盖可见光、红边及近红外区域,在工程可实现性与应用需求之间取得了较好的平衡。滤光膜系采用“一次成膜、多片裁切”的批量化制备方式,即在单次镀膜过程中完成大面积基底沉积,再裁剪得

到多片像元级滤光片,从而在保证滤光膜系工艺一致性的同时,显著提升了批量制备效率与良品率。

2.1.2 光谱载荷集成

为保证CMOS图像传感器在运输、存储及使用过程中的可靠性,商业化CMOS器件通常采用带保护玻璃窗口的封装形式。然而,在像元级马赛克滤光式多光谱成像系统中,为实现滤光结构与感光像元的紧密贴合并获得高精度的像元级分光效果,需要去除传感器原有的保护玻璃窗口。本研究采用两种可行方案实现去窗处理:一是对已封装CMOS图像传感器进行热处理,将传感器置于约300℃环境下加热15 min,使保护玻璃与封装结构分离并完成拆除;二是直接选用厂家提供的无窗口玻璃封装CMOS图像传感器,以降低二次加工过程的潜在风险。

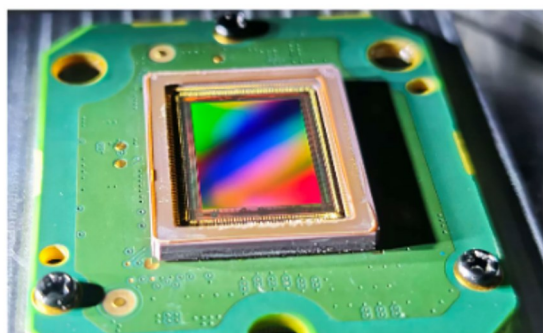
在完成去窗处理后,对 CMOS 图像传感器进行了系统级集成与封装。首先将裸芯片通过表面贴装工艺封装至专用成像板,并通过软排线与 FPGA 处理板及接口板相连。针对系统大靶面、高帧率成像的高数据吞吐量需求,数据传输接口选用万兆以太网,最高传输速率可达 10 000 Mbit/s;同时配备数字 I/O 接口,支持光耦隔离的外部硬触发同步输入。系统供电采用 9~24 V 直流宽压设计,并支持 2×2 像元合并模式。封装完成的相机在 4 096×3 072 分辨率、Mono8 模式下最高帧率可达 94 fps,能够满足机载快照式多光谱成像应用的高帧率要求。

随后,将成像板与 CMOS 传感器整体从相机外壳中拆卸,并固定于专用封装工装上(如图 2(a)所示),以开展像元级马赛克滤光片的精密对准与封装。为进一步抑制像元级马赛克分光膜系的通带外响应、降低杂散光影响并提升光谱测量精度,在马赛克滤光片上方引入具有带通特性的窗口片(如图 2(b)所示),形成“带通窗口片—

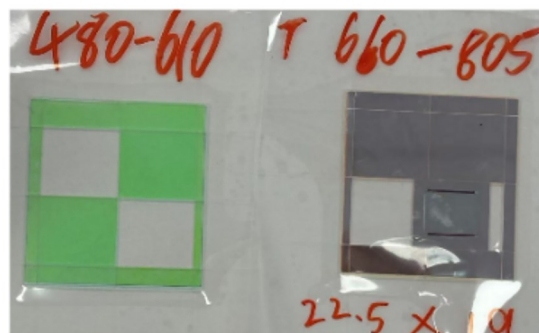
马赛克滤光片—感光芯片”的多层光学封装结构。

具体封装工艺流程如图 2(c)所示。首先,利用结构胶将马赛克滤光片通过精密垫条与带通窗口片粘接并固化;随后,将回型垫圈与 CMOS 传感器陶瓷壳体进行粘接固化;最后,在显微光学对准系统下,将上述两部分进行高精度空间对准与整体粘接,使各滤光通道与对应感光像元在空间位置上实现一一匹配,从而在像元层面完成光谱分光。垫条与回型垫圈的厚度需经过精心设计;当马赛克滤光片与感光芯片表面间距过小时,易产生薄膜干涉效应,导致牛顿环等干涉条纹;而间距过大则会引入相邻通道间的光谱串扰,严重劣化系统的光谱分辨与定量精度。

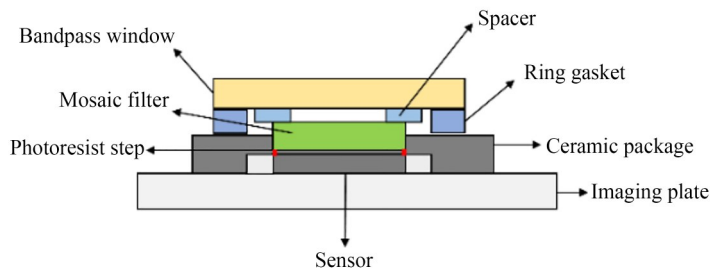
完成固化封装后的光谱芯片如图 2(d)所示。为验证像元级对准精度与封装一致性,对感光区域左上、左下、右上及右下等多个位置进行光谱透过测试。实验结果表明,各区域对应通道的透射光谱形态与中心波长基本一致,说明马赛克滤



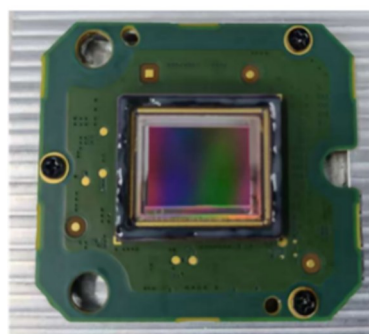
(a) 固定在成像板上的开窗芯片
(a) Sensor with window removed, mounted on the imaging plate



(b) 带通窗口片
(b) Bandpass window



(c) 封装工艺流程
(c) Packaging process flow



(d) 封装完成的芯片
(d) Packaged imaging sensor

图 2 光谱芯片封装

Fig. 2 Spectral chip encapsulation

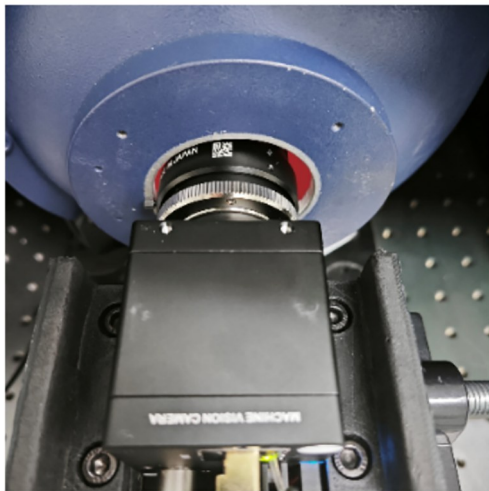
光片与感光像元之间对准精度良好,封装质量满足系统设计要求。

最后,将封装完成的光谱芯片重新装配至相机外壳中,并在最外层设置防尘玻璃窗口。相机采用标准C口法兰接口,可灵活适配多种商用镜头。由于光谱分光过程在芯片像元层面完成,系统无需额外的光栅或其他复杂光路结构,从而显著降低了多光谱成像系统的体积与重量,提高了系统集成度与工程适用性。

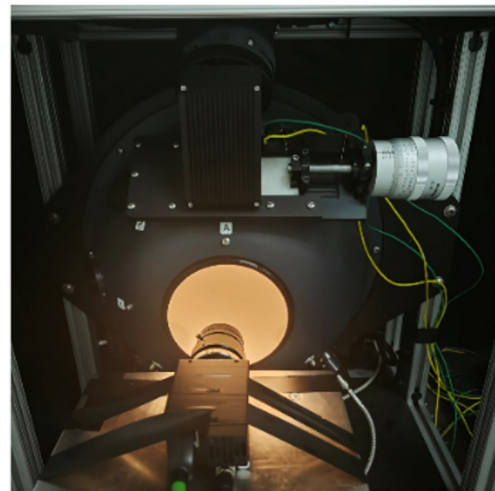
2.1.3 波长与辐射定标

波长定标旨在确定多光谱相机各子通道对应的中心波长及光谱带宽参数。本研究采用光栅单色仪与积分球相结合的方式开展波长定标

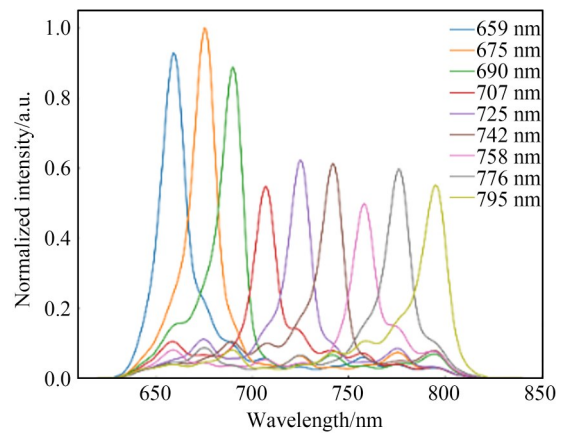
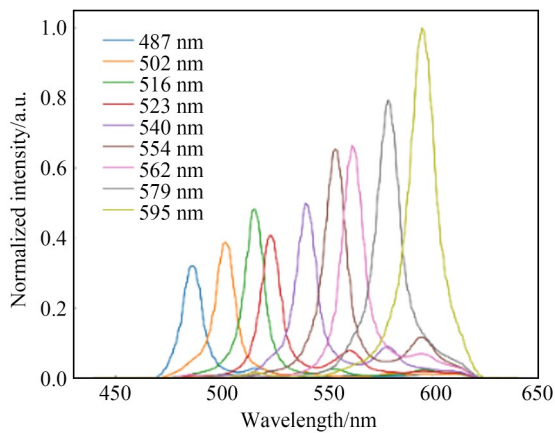
实验,如图3(a)所示。实验在暗室条件下进行,单色仪输出窄带可调谐单色光,并通过积分球进行空间均匀化处理,以保证入射到相机视场内的辐射在空间分布上的一致性。通过在目标光谱范围内按固定步长扫描波长,记录相机在不同波长条件下的灰度响应,构建归一化强度—波长响应曲线,从而确定各子光谱通道的中心波长及半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)。如图3(c)所示,定标结果表明,各通道中心波长与设计波段位置一致性良好:在预先设计的480~600 nm光谱范围内,覆盖487,502,516,523,540,554,562,579,595 nm九个中心波长;在预先设计的650~800 nm光谱范围内,覆盖659,



(a) 波长定标
(a) Wavelength calibration



(b) 辐射定标
(b) Radiometric calibration



(c) 双相机18波段波长定标结果
(c) Dual-camera 18-band wavelength calibration results

图3 波长与辐射定标

Fig. 3 Wavelength and radiometric calibration

675, 690, 707, 725, 742, 758, 776, 795 nm 九个中心波长。而光谱带宽基本遵循中心波长的2%这一规律,可满足后续多光谱分析对波长精度的要求。

辐射定标同在暗室条件下进行,采用均匀宽谱积分球光源提供稳定辐射输出,并使用高分辨率光谱辐射计同步测量不同通光量条件下的真实光谱辐亮度,如图3(b)所示。相机在多组曝光时间与辐亮度组合条件下采集原始图像,并记录对应的暗场数据以消除探测器暗电流与背景噪声影响。在数据处理过程中,对各光谱通道提取有效像元响应并进行暗噪声校正,基于探测器灰度值对辐亮度和曝光时间呈线性响应的假设,建立DN值、辐亮度与曝光时间之间的线性关系模型,并通过多组实验数据进行线性回归,获得各通道的辐射定标系数。结果表明,各通道线性拟合的皮尔森相关系数均接近1,整体拟合效果良好。

2.2 光学吊舱系统

2.2.1 热红外载荷选型与性能分析

为实现与多光谱载荷在画幅尺寸上的有效匹配,热红外载荷选取了当前商用靶面尺寸最大的1 280×1 024非制冷红外探测器—高芯科技公司的GST1212系列。该探测器采用非制冷氧化钒(V₂O₅)微测辐射热计材料,具有无需低温制冷、结构紧凑、功耗低等优势,便于与多光谱系统进行一体化集成,适用于机载与轻小型平台。探测器工作波段覆盖8~14 μm,像元尺寸为12 μm。实测结果表明,该探测器在25℃条件下的像元噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)优于27.9 mK,响应率非均匀性不高于5%,具备良好的热灵敏度和一致性,为后续热辐射分析提供了可靠保障。

热红外机芯主要由快门组件、探测器组件以及信号处理组件三部分构成。其中,快门组件采用电磁阀式快门结构,具有响应时间短、遮挡均匀性好等特点;探测器组件采用前述的GST1212系列非制冷红外焦平面探测器;信号处理组件负责完成探测器驱动、非均匀性校正等图像处理算法以及图像数据的送显等功能。机芯支持USB 3.0扩展数据接口,最高数据读出频率可达30 Hz,采用5 V直流电源供电,并可适配多

种无热化红外镜头,整体具备良好的系统集成灵活性。

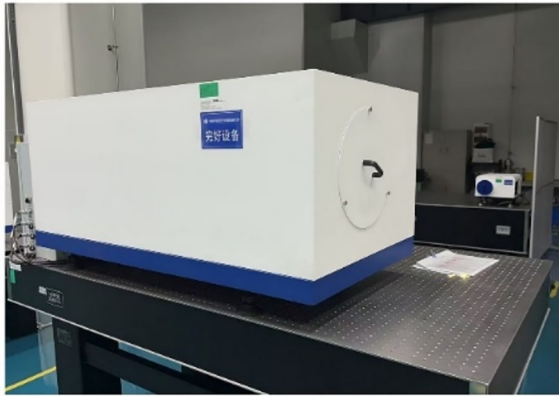
2.2.2 吊舱系统集成与调校

为满足空间分辨率要求并实现精细化制图,两台快照多光谱载荷均选用KOWA公司75 mm定焦镜头(型号:LM75FC24M)。该镜头可良好适配GMAX3412探测器的1.1英寸靶面,对角线视场角为13.3°,在487~795 nm光谱范围内透射率可达90%以上,能够有效保证可见—近红外多光谱成像的辐射通量。由于经过2×2像元合并和3×3周期的像元级马赛克滤光片排布设计,最终经过解码得到的光谱图像分辨率在长宽方向均下降至原来的1/6,即为680×510。热红外载荷选用高德智感公司75 mm F1.0电调镜头,适配GST1212探测器靶面,对角线视场角为14.9°,该镜头最前端镀有类金刚石碳(DLC)保护膜,具备良好的抗侵蚀能力。

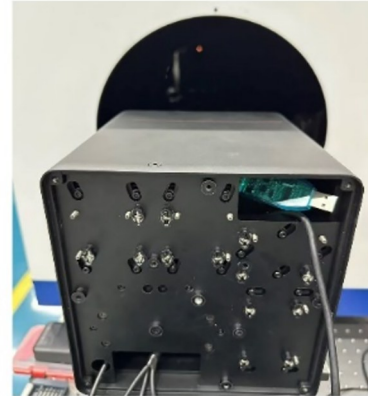
除上述三台成像载荷外,系统还集成了一套激光测距载荷和一套高清可见光载荷,以进一步拓展综合感知能力。其中,激光测距载荷基于1 535 nm钕玻璃激光器,采用单脉冲飞行时间(Time of Flight, TOF)测距方式,最大测程不小于3 km;高清可见光载荷为30倍变焦、400万像素黑光级相机,可在低照度条件下提供高分辨率可见光图像,实现多源信息互补。此外,各载荷光学窗口片均采用压圈结构进行固定。其中,热红外载荷窗口片选用锆材料,内表面镀覆宽带增透膜,外表面镀覆DLC保护膜,在8~14 μm波段范围内平均透过率高于90%。激光测距载荷窗口片针对1 535 nm波段进行优化设计,在(1 535±10)nm范围内镀覆高效增透膜,透过率大于99%,有效保证测距性能。其余三台成像载荷窗口片均采用K9光学玻璃材料,满足可见—近红外波段成像需求。

为保证多载荷之间光轴在无限远处精确重合,采用施密特光学仪器公司的反射式平行光管(型号:F3.5 m-D300 mm,如图4(a)所示)进行光轴调校,并通过闭口环拉力弹簧与精密细牙顶丝对各载荷姿态角进行微调(如图4(b)所示)。完成调校后,利用腰孔结构与螺栓对各载荷进行最终固定,从而确保系统在飞行过程中的稳定性。

如图4(c)所示,光学吊舱整体安装于复合翼



(a) 反射式平行光管
(a) Reflective collimator



(b) 光轴调校中
(b) Optical axis alignment



(c) 光学吊舱安装在复合翼无人机上
(c) Optical pod mounted on UAV



(d) 光学吊舱内部子载荷
(d) Optical pod sub-payload

图 4 光学吊舱系统集成

Fig. 4 Optical pod system integration

无人机机腹位置。鉴于无人机在飞行过程中产生的高频振动对成像质量的影响,在吊舱与机体连接处额外引入钢丝绳减震器,以降低振动传递。光学吊舱内部各子载荷的集成布局如图 4 (d)所示,为实现多载荷协同工作,开发并编写了一套统一控制脚本,通过软触发方式对五个载荷进行同步控制,实现多源数据的同时采集,为后

续多模态信息融合与联合分析奠定基础。

最终设计的多维光学吊舱整体尺寸为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 26\text{ cm}$,总重量约为 6 kg ,最高工作功耗为 30 W 。表 1 展示了本研究光学吊舱与现有商用系统 MS600 和 Altum PT 的关键技术参数对比,结果表明本系统在光谱通道数量、空间分辨率、热红外分辨率等方面均具有明显优势。

表 1 本吊舱系统与其他典型系统的对比

Tab. 1 Comparison between this pod system and other typical systems

	MS600	Altum PT	本系统
光谱通道数量	6	5	18
空间分辨率(取决于镜头)	不可更换	不可更换	自由配置
热红外分辨率	/	320×256	$1\ 280 \times 1\ 024$
镜头数量	6	5	2
载荷选配能力	/	/	微光夜视+激光测距

3 多源异构数据融合

3.1 几何配准

多源异构数据在进入融合与分析流程之前,必须通过数据配准建立统一的空间参考关系,以确保不同传感器获取的图像在同一地物位置上具有一一对应关系,这是实现多源信息有效融合与后续分析的前提条件。本研究重点关注多光谱与热红外图像的融合方法研究,可见光图像不在本文的讨论范围之内。针对多载荷系统中由传感器差异、安装姿态以及软触发方式引起的曝光时序不一致等因素所导致的空间失准问题,本研究在数据预处理阶段对多源图像进行统一的几何配准处理,以保证不同传感器获取数据在同一空间参考框架下的精确对应。

由于多光谱数据由两台独立的快照多光谱相机获取,不可避免地产生轻微的旋转和平移误差,但整体视角差异较小、成像尺度一致,因此采用平移与旋转变换即可满足配准需求。具体而言,以795 nm单波段图像数据作为参考,对其余17张单波段图像进行批量刚性配准,从而实现多光谱波段之间的空间一致性。相比之下,多光谱与热红外图像在成像机理、空间分辨率及纹理特征等方面差异显著,自动特征匹配方法难以稳定工作。针对该问题,本研究采用ImageJ软件中的Big Warp工具^[17],通过人工选

取不少于四对特征点,基于仿射变换模型计算空间映射矩阵,实现多光谱与热红外图像之间的精确配准,为后续多源异构数据融合分析提供可靠的几何基础。

3.2 光谱特征扩增

为充分挖掘多光谱数据中蕴含的判别信息,本文在原始多光谱波段数据的基础上引入光谱特征扩增策略^[18]。相较于直接使用单波段反射信息,光谱指数及统计特征能够突出地物在光谱维度上的本质差异,因此被广泛应用于植被监测、水体识别及地表覆盖分类等任务中。

具体而言,本文从归一化差异类指数、经验植被指数以及光谱统计与稳定性特征三个层面构建扩增光谱特征集(如表2所示)。首先,引入多种归一化差异指数,通过不同波段之间的比值关系增强植被活性、水体分布及红边响应特征;其次,选取典型的经验植被指数以强化绿色植被的光谱响应并降低土壤背景干扰;最后,从多光谱数据的整体分布角度出发,计算光谱亮度、标准差及平坦度等统计特征,用于刻画像元在光谱维度上的稳定性与起伏特征,从而增强对裸土、人造物等非植被目标的区分能力。通过上述光谱特征扩增,可在保持原始物理意义的同时,构建面向应用需求的高判别力特征空间,为后续降维分析与无监督/监督分类提供更加丰富的信息。

表2 扩增的光谱特征

Tab. 2 Augmented spectral features

类别	特征名称	数学表达式	物理/应用意义
归一化差异指数	NDVI	$(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$	表征植被覆盖度与活性
归一化差异指数	GNDVI	$(\text{NIR}-\text{GREEN})/(\text{NIR}+\text{GREEN})$	对高叶绿素含量植被更敏感
归一化差异指数	NDRE	$(\text{NIR}-\text{RE})/(\text{NIR}+\text{RE})$	强化红边响应,适用于植被生长状态分析
归一化差异指数	NDWI	$(\text{GREEN}-\text{NIR})/(\text{GREEN}+\text{NIR})$	突出水体信息
经验植被指数	SAVI	$1.5 \times (\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}-\text{RED}+0.5)$	降低土壤背景对植被指数的影响
经验植被指数	VARI	$(\text{GREEN}-\text{RED})/(\text{GREEN}+\text{RED}-\text{BLUE})$	基于可见光波段的植被增强指数
经验植被指数	ExG	$2 \times \text{GREEN}-\text{RED}-\text{BLUE}$	强化绿色植被特征,常用于植被提取
光谱统计特征	Brightness	$\text{mean}(\text{ms})$	表征像元整体亮度水平
光谱统计特征	Spectral Std	$\text{std}(\text{ms})$	描述光谱起伏程度与内部差异
光谱稳定性特征	Flatness	$\text{std}(\text{ms})/\text{mean}(\text{ms})$	表征光谱平坦度,用于区分裸土与人造物

注:RED, GREEN, BLUE, NIR和RE分别表示红光、绿光、蓝光、近红外及红边波段反射信息,ms表示像元在全部多光谱波段上的反射向量。

3.3 主成分提取与无监督聚类

在遥感图像处理中,高特征维度能够有效增强地物特征的表达能力,但同时也不可避免地带来了较为严重的数据冗余问题^[19]。多光谱波段之间普遍存在较强相关性,而光谱指数与原始光谱波段之间也存在显著的信息重叠,这在一定程度上降低了无监督聚类方法对地物本质差异的判别能力。因此,本文引入主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)解决数据冗余问题^[20]。PCA通过正交变换将高维特征空间映射至相互独立的低维子空间,在有效抑制冗余信息与噪声干扰的同时,最大限度地保留原始数据的主要方差信息,从而为后续无监督聚类提供更加紧凑且具有判别性的特征输入。

本研究首先对原始多光谱特征和扩增的光谱特征采用PCA进行特征降维,提取累计方差贡献率较高的前三个主成分图像,来表征光谱信息的主要特征。为了引入热红外图像在地物热辐射特性方面的区分能力,本研究在保留前两个主成分的基础上,将第三主成分替换为经归一化处理的热红外图像,从而构建融合光谱特征与热辐射信息的三维特征空间。在此基础上,分别将未引入热红外图像的前三个主成分图像以及引入热红外图像后的融合特征图像作为输入,采用K-means聚类算法进行无监督聚类对比实验^[21]。K-means通过最小化类内平方误差实现样本在特征空间中的自适应聚类,能够有效表征不同类型地物在地理空间中的自然分布状况。在后续的4.2.3小节中,将通过两种特征构建方式下聚类结果的对比分析,验证增加热红外图像源后在提升地物分类能力方面的有效性。

3.4 人工图像标注与评价指标

为了客观定量地评估验证多光谱与热红外数据融合相较于单一多光谱数据在地物分类中的性能提升效果,需对目标图像进行人工标注,并引入评价指标对分类结果进行定量分析。人工标注作为无监督分类结果评价的参考真值,能够有效保证评估的客观性与可靠性。在本研究中,人工标注仅用于事后评价,不参与聚类过程。

本研究采用Labelme标注工具对分类图像进行像素级区域标注^[22],根据地物类别对目标区域进行精确划分,构建先验参考数据标签。在此

基础上,将无监督聚类得到的分类结果与人工标注结果进行对比分析。为评价地物分类精度,本研究选取遥感图像语义分割应用中常用的交并比(Intersection over Union, IoU)和Dice系数(Dice Similarity Coefficient, Dice)作为定量评价指标^[23],计算公式如下:

$$\text{IoU} = \frac{|P \cap G|}{|P \cup G|}, \quad (1)$$

$$\text{Dice} = \frac{2|P \cap G|}{|P| + |G|}, \quad (2)$$

其中: P 表示聚类结果中对应类别的预测区域, G 表示人工标注对应类别的真值区域。 $|\cdot|$ 表示区域内像素点数量。IoU与Dice系数的取值范围为 $[0, 1]$,数值越大表示该地物类别分类精度越高。IoU通过计算预测结果与参考标签之间的交集与并集之比,反映分类结果在空间重叠程度上的准确性,而Dice系数对小目标区域与边界误差具有较高的敏感性。两种指标从不同侧重点对分类结果进行综合评价,相比仅基于混淆矩阵统计的总体精度指标,IoU与Dice系数对于边界偏移、区域破碎等误差更加敏感,有助于更加全面地反映融合热红外信息后对地物分类性能的提升效果。

4 野外飞行实验与初步应用

4.1 研究区域与实验配置

研究区域选在宁夏回族自治区吴忠市盐池县长城关机场及周边区域(如图5(a)所示)。该区域位于毛乌素沙地西南边缘,平均海拔约1369 m,中心基准坐标点为北纬 $37^{\circ}51'22''$ 、东经 $107^{\circ}25'18''$,地势开阔平坦、视场无遮挡,净空条件良好。机场空域条件相对宽松,飞行环境安全可控,便于开展多架次、不同高度和速度条件下的重复飞行实验,为系统性能验证和数据对比分析提供了良好的实验条件。

研究区域地表覆盖类型具有一定多样性,主要包括沙地、田地、植被、水体和道路等典型地物,不同地物在可见—近红外及热红外波段表现出明显差异,能够充分发挥快照多光谱载荷与热红外载荷在多维信息获取方面的优势,适合作为多源遥感载荷协同成像与初步应用验证的典型实验区。

飞行平台选用航天飞鹏公司的FP-981C系列复合翼无人飞行器(如图5(b)所示)。该飞行器兼具固定翼与旋翼的构型优势,具有起降方式灵活、巡航效率高及续航时间长等特点,能够满

足中大尺度区域遥感数据获取对航程与稳定性的要求。如图5(c)所示,飞行器配备三屏一体化地面控制站,用于任务航线规划、飞行控制以及机载图像数据的实时下传与预览。



(a) 研究区域卫星图像
(a) Satellite image of the study area

(b) 光学吊舱执行任务中
(b) Optical pod during flight mission

(c) 地面控制站
(c) Ground control station

图5 实地飞行实验

Fig. 5 Field flight experiments

本研究分别于2025年9月28日、2025年10月17日和2025年12月2日开展了三次野外飞行实验。飞行过程中设置了500 m和2 000 m两种相对飞行高度,以对比分析不同空间分辨率条件下机载多源遥感数据的成像效果与应用性能。飞行巡航速度约为120 km/h,飞行姿态整体稳定,实验过程覆盖了研究区内多种典型地表类型,为后续数据处理与应用分析提供了有效的数据支撑。

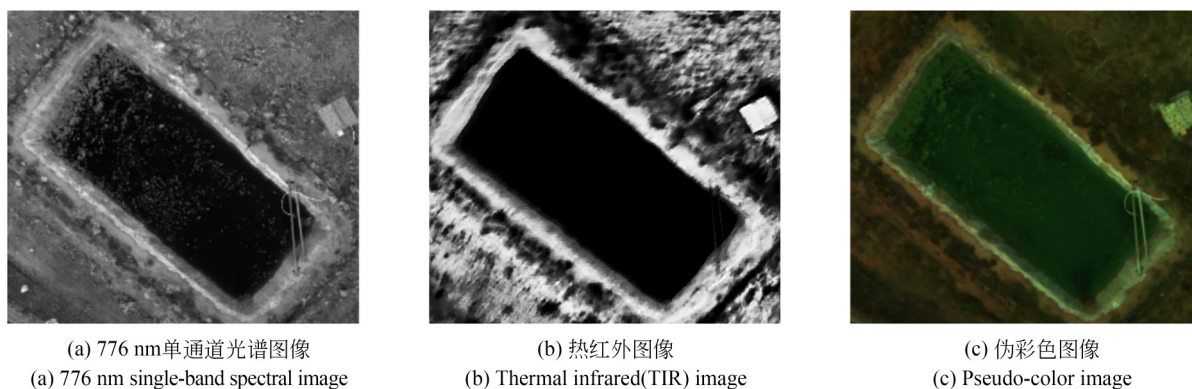
4.2 典型应用

4.2.1 水域边界提取

图6(a)为776 nm近红外单波段图像,可清晰地反映水体与周围植被、裸土的反射差异;图6

(b)为热红外图像,水体呈明显暗色,而漂浮植物或水面杂物几乎不凸显;图6(c)为伪彩色合成图像,采用红光(659 nm)、绿光(554 nm)和蓝光(487 nm)波段组合,符合人眼视觉感知。图6(d)为基于NDWI指数计算的空间分布图,可反映水体整体分布;图6(e)为基于NDWI指数阈值划分的二值化掩膜图,将水体显示为深蓝、非水体为白色,可观察到水面漂浮物引起的水体区域碎片化现象;图6(f)为基于归一化热红外图像阈值划分得到的水体二值化掩膜图,水域边界清晰、连通性好(彩图见期刊电子版)。

相比于NDWI方法,基于热红外图像的水体划分方法能够完整提取水体轮廓,并有效减少对



(a) 776 nm单通道光谱图像
(a) 776 nm single-band spectral image

(b) 热红外图像
(b) Thermal infrared(TIR) image

(c) 伪彩色图像
(c) Pseudo-color image

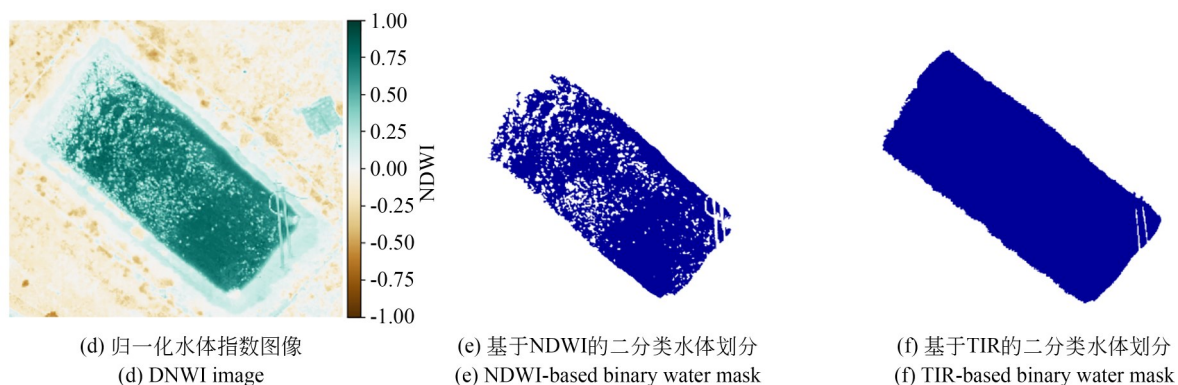


图 6 水体轮廓提取结果

Fig. 6 Water boundary extraction result

水面漂浮物(如浮水植物、水面垃圾等)的误判,呈现连续、完整的水体边界。其原因在于水体在热红外波段具有稳定且一致的低温辐射特征,水面漂浮物由于与水体直接接触,通过热传导迅速与水体达到热平衡,在热红外图像中呈现出与水体相近的表现温度特性,从而不会被误判为非水体。因此,该方法在沿海水域及河湖岸线等复杂水面环境的边界提取中具有显著应用潜力。

4.2.2 植株检测与统计

图 7(a)为基于 554 nm, 659 nm 和 776 nm 波段合成的可见光伪彩色图像;图 7(b)为基于 NDVI 指数计算的空间分布图,绿色区域对应植被覆盖区,能够在一定程度上增强灌丛与周围沙地的对比;图 7(c)为热红外图像,沙地与灌丛在热辐射特性上表现出明显差异,灌丛整体呈现出相对较低的表现温度特征。图 7(d)为基于 NDVI 指

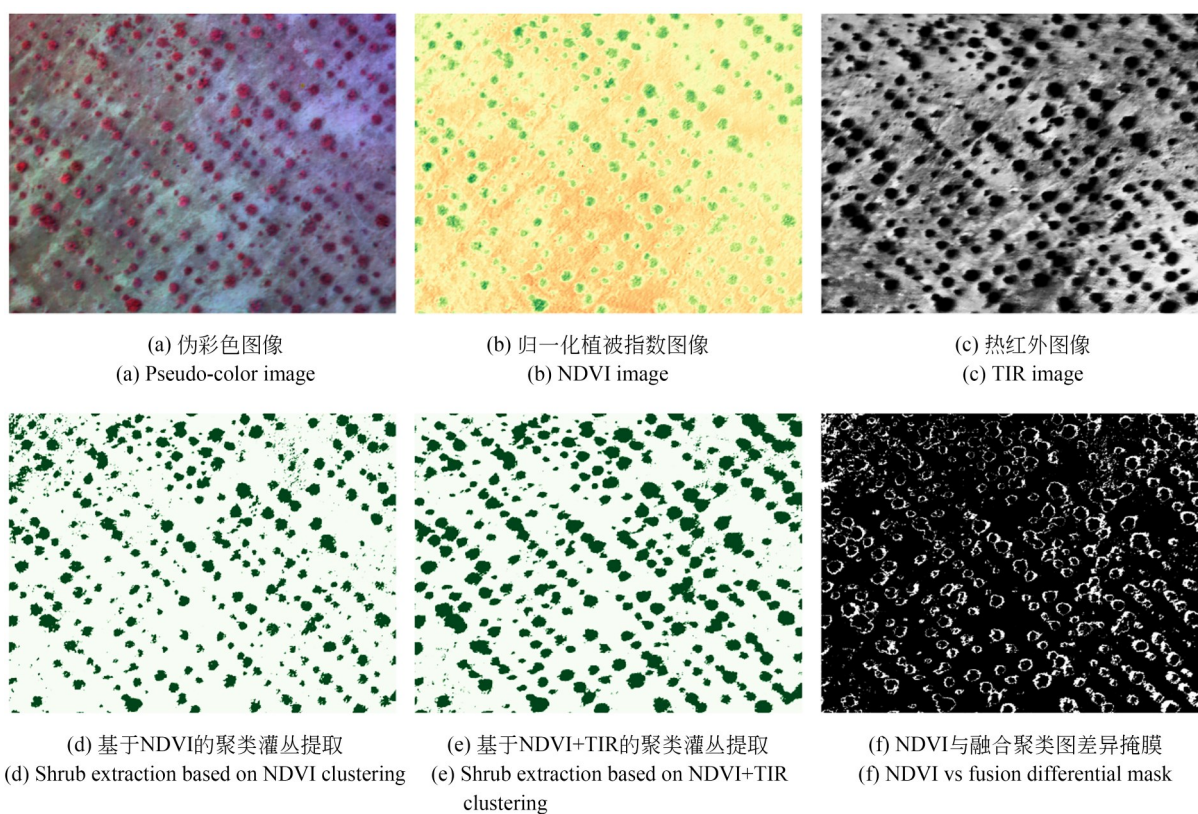


图 7 灌丛分割结果

Fig. 7 Shrub segmentation results

数的KMeans聚类二值化掩膜图,将灌丛区域识别为深绿色,可观察到NDVI单独处理时存在轮廓缺失和小型灌丛漏检误检等问题;图7(e)为NDVI与热红外信息融合后的KMeans聚类二值化掩膜图,通过结合温度与植被指数特征,灌丛边界更加完整、形状规则;图7(f)为图7(d)和7(e)的差异化掩膜图,显示了加入热红外信息后新增提取的灌丛区域,可直观呈现融合带来的增量效果(彩图见期刊电子版)。

相比于单独NDVI方法,加入热红外信息后能够有效增强灌丛区域的可分辨性,使灌丛形状呈现更规则的空间轮廓。这主要得益于热红外波段对地物温度差异的敏感性,灌丛植被

由于蒸腾作用在热红外波段表现出相对稳定的低温辐射特征,而周围裸沙地在日照条件下升温较快,二者在热红外图像中具有良好的可分性。

另一个例子如图8所示,图8(a)和图8(b)分别为659 nm和776 nm单波段图像,两者能够有效区分植被与非植被区域,但难以区分单棵树结构。相比之下,图8(c)为热红外图像,树干的热响应与冠层区域差异显著,能够清晰地统计树木数量并观察森林的整体分布状况。综上所述,融合热红外图像信息在植株检测与统计方面具有优势,可有效服务于高精度植被覆盖调查与管理。

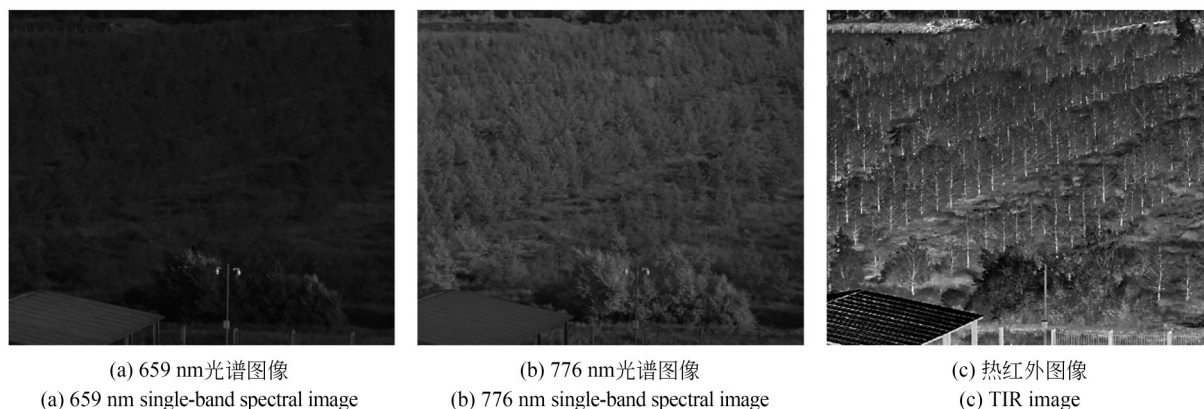


图8 树木数量与分布检测

Fig. 8 Tree count and spatial distribution detection

4.2.3 地物精细分类

图9(a)上方为742 nm单波段光谱图像,可在一定程度上区分农作物、杂草与裸土区域;下方为675 nm单波段光谱图像,能够有效区分混凝土与杂草,但对于混凝土与裸土区域的区分能力有限。图9(b)为热红外原始图像,不同类型地物在热辐射响应上的差异明显,可直观反映地物之间的热辐射特性。图9(c)为人工标注的真值图像,白色凸显区域分别为农作物与混凝土。图9(d)为基于特征构建方式1(如章节3.3中所述)进行的K-means聚类结果,可观察到明显的误分类现象。图9(e)为特征构建方式2进行的聚类结果,整体误分类情况明显减少。

对于第1行示例,其目标为提取农作物覆盖区域。在光谱图像中,农作物与杂草在反射率特性上具有较强相似性,导致基于光谱特征的聚类

结果中,部分杂草被误分类为农作物。而在热红外图像中,农作物由于蒸腾作用和较高含水量,其温度通常显著低于周围地表;相比之下,杂草区域由于其稀疏特性,像元内包含裸土成分,其热辐射响应明显高于农作物。因此,引入热红外信息后,可显著增强农作物与杂草之间的对比度,从而减少农作物分类提取过程中的误分类现象。

对于第2行示例,其目标为提取混凝土覆盖区域。在光谱图像中,混凝土与裸土在可见光及近红外波段的反射率特性较为相似,导致仅基于多光谱及其扩增特征的聚类结果中,部分裸土区域被误分类为混凝土。而在热红外图像中,由于人造材料的热惯量特性,使得混凝土在热红外图像中表现出较低的热辐射响应,从而增强了两者之间的可分性。

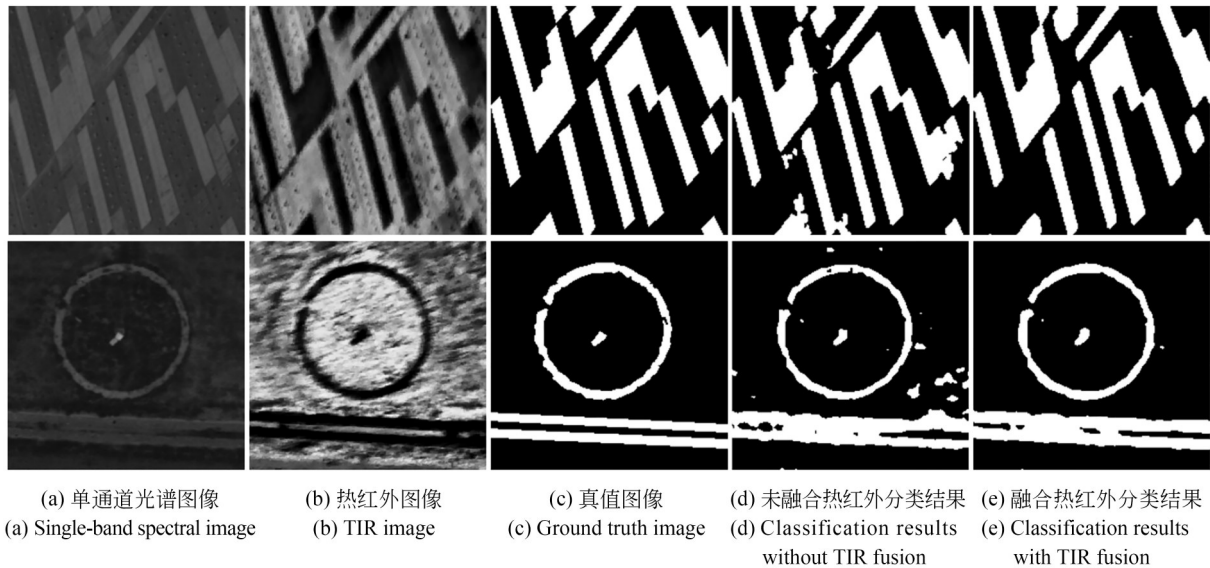


图9 地物分类结果

Fig. 9 Land-cover classification results

评价指标计算结果如表3所示。对于示例1,在引入热红外特征后,图像分类的IoU提升了2.7%,Dice系数提升了1.7%;对于示例2, IoU提升了6.6%,Dice系数提升了4.5%。上述结果表明,融合热红外信息能够有效提升地物精细分类效能。

表3 评价指标计算

Tab. 3 Calculation of evaluation metrics

示例	未融合热红外		融合热红外	
	IoU	Dice系数	IoU	Dice系数
示例1	0.818	0.899	0.845	0.916
示例2	0.683	0.812	0.749	0.857

5 结 论

本文面向机载多模态遥感应用需求,设计并研制了一种集成快照多光谱与高分辨率热红外成像能力的多维光学吊舱系统。所研制的快照多光谱载荷采用像元级马赛克滤光体制,通过双相机协同实现480~600 nm与650~800 nm两个光谱子区间的覆盖,共获取18个离散波段;结合2×2像元合并策略,实现6.8 μm单谱段等效覆盖尺寸,解码后多光谱图像的有效空间分辨率可达680×510。在此基础上,系统进一步集成1280×1024分辨率的非制冷热红外载荷,实现多光谱反射信息与热辐射信息的同步获取。通

过多光谱—热红外几何配准、光谱特征扩增、主成分分析与无监督聚类的融合处理流程,在水域边界提取、植株检测统计与地物精细分类应用中初步验证了系统性能。在融合热红外信息后,地物分类的IoU和Dice系数指标均得到有效提升。实验结果表明,该多模态光学吊舱在自然资源调查与生态环境监测中具有良好的应用潜力。

在上述工作基础上,该多维光学吊舱系统仍有若干问题有待进一步深入研究与完善。首先,得益于快照多光谱成像体制不依赖平台运动完成光谱维采样,该系统除机载遥感应应用外,还可与两轴或三轴转台进行集成,拓展至海岸带监测等场景,体现出良好的应用通用性与平台适配能力。其次,当前系统为满足空间分辨率需求选配了相对长焦距光学镜头,在一定程度上增加了吊舱整体体积与重量。后续可通过选用短焦镜头、减配光学配置等手段实现系统的小型与轻量化,从而适配多旋翼等小型无人机平台,进一步提升系统部署的灵活性。此外,目前多光谱与热红外图像之间的几何配准主要依赖人工交互方式,存在一定主观性和效率限制,研究面向多模态数据的高精度自动配准方法将是下一步亟须解决的关键问题。最后,开展机上实时处理、多光谱图像去马赛克,以及引入多模态深度学习方法以充分挖掘光谱-热辐射协同信息,也将成为该系统未来的重要发展方向。综合来看,上述改进将有

助于进一步拓展系统应用边界,提升其实用性与工程化水平。

作者贡献声明:

赵宇博:论文构思,方法论和初稿写作;

占杰:数据管理和软件开发;

吕昊:调查研究与结果验证;

刘晓煌:指导工作;

于涛:项目管理,审核与编辑写作;

胡炳樑:获取资助。

参考文献:

- [1] ZHANG Z X, ZHU L X. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: platforms, sensors, data processing methods, and applications [J]. *Drones*, 2023, 7(6): 398.
- [2] JAVAN F D, SAMADZADEGAN F, TOOSI A, *et al.* Unmanned aerial geophysical remote sensing: a systematic review [J]. *Remote Sensing*, 2024, 17(1): 110.
- [3] ZHANG H, XU H, TIAN X, *et al.* Image fusion meets deep learning: a survey and perspective [J]. *Information Fusion*, 2021, 76: 323-336.
- [4] BAMROONGSHAWGASAME T, ZHANG X, LI Q L. Emerging trends and applications in thermal imaging using infrared detectors: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2026, 26(2): 1520-1532.
- [5] KUANG X H, CHENG Q, CHEN D S, *et al.* Intelligent diagnosis of winter wheat water stress based on UAV multi-modal remote sensing [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2026, 13: 101781.
- [6] 许廷发, 李天昊, 王颖, 等. 光谱信息扩展的单目标跟踪技术研究进展 [J]. *信号处理*, 2024, 40(11): 1925-1950.
XU T F, LI T H, WANG Y, *et al.* Recent advances in single object tracking methods with extended spectral information [J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(11): 1925-1950. (in Chinese)
- [7] JAAFAR H H, SUJUD L H. High resolution evapotranspiration from UAV multispectral thermal imagery: Validation and comparison with EC, Landsat, and fused S2-MODIS HSEB ET [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 136: 104359.
- [8] 王俊丰, 郭京珠. 基于深度学习的风机视觉巡检系统研究 [J]. *信息技术与信息化*, 2025(9): 12-15.
WANG J F, GUO J Z. Research on fan vision inspection system based on deep learning [J]. *Information Technology and Informatization*, 2025(9): 12-15. (in Chinese)
- [9] 徐阳, 毛艺霖, 李赫, 等. 基于多光谱和高光谱的茶树越冬期 REC、SPAD 和 MDA 预测模型 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2025, 45(1): 256-263.
XU Y, MAO Y L, LI H, *et al.* Multispectral and hyperspectral prediction models of REC, SPAD and MDA in overwintered tea plant [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2025, 45(1): 256-263. (in Chinese)
- [10] JIANG X T, SUN S P, ADAMCHUK V, *et al.* Spinach yield mapping using multispectral UAV imagery [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2024, 7: 100389.
- [11] GAO L, WANG L V. A review of snapshot multi-dimensional optical imaging: Measuring photon tags in parallel [J]. *Physics Reports*, 2016, 616: 1-37.
- [12] MENGU D, TABASSUM A, JARRAHI M, *et al.* Snapshot multispectral imaging using a diffractive optical network [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 86.
- [13] WANG Y X, SHAO M C, WANG J C, *et al.* SMICGS: a novel snapshot multispectral imaging sensor for quantitative monitoring of crop growth [J]. *Plant Phenomics*, 2025, 7(2): 100056.
- [14] TANG W J, WANG N, ZHAO R M, *et al.* Chlorophyll detector development based on snapshot-mosaic multispectral image sensing and field wheat canopy processing [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 197: 106999.
- [15] GOESSINGER E V, DITTRICH P G, NÖCKER P, *et al.* Classification of melanocytic lesions using direct illumination multispectral imaging [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 19036.
- [16] 余晓畅, 赵建村, 虞益挺. 像素级光学滤波-探测集成器件的研究进展 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 999-1012.
YU X C, ZHAO J C, YU Y T. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5):

- 999-1012. (in Chinese)
- [17] BOGOVIC J A, HANSLOVSKY P, WONG A, *et al.* Robust registration of calcium images by learned contrast synthesis[C]. 2016 *IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*. April 13-16, 2016, Prague, Czech Republic. IEEE, 2016: 1123-1126.
- [18] MONTERO D, AYBAR C, MAHECHA M D, *et al.* A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research[J]. *Scientific Data*, 2023, 10: 197.
- [19] LI H D, CUI J, ZHANG X L, *et al.* Dimensionality reduction and classification of hyperspectral remote sensing image feature extraction[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4579.
- [20] BHARADIYA J P. A tutorial on principal component analysis for dimensionality reduction in machine learning [J]. *International journal of innovative science research technology*, 2023, 8 (5) : 2028-2032.
- [21] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, *et al.* K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data [J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178-210.
- [22] NURADILI P, ZHOU J, ZHOU X B, *et al.* UAV remote-sensing image semantic segmentation strategy based on thermal infrared and multispectral image features[J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2023, 4 (3) : 311-319.
- [23] VAGHELA R, SRAVYA N, LAL S, *et al.* Multi head attention based deep learning framework for waxberry fruit object segmentation from high resolution remote sensing images[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 37773.

作者简介:



赵宇博(1999—),男,山西长治人,博士研究生,2020年于西安电子科技大学获得学士学位,2023年于陕西师范大学获得硕士学位,现就读于中国科学院西安光学精密机械研究所,主要从事偏振与高光谱系统设计与数据处理研究。E-mail: zhaoyubo@opt. ac. cn

通讯作者:



于涛(1979—),男,山东潍坊人,中国科学院西安光学精密机械研究所研究员,博士生导师,分别于2004年、2009年于武汉大学获得学士与硕士学位,2016年于中国科学院大学获得光学工程博士学位,美国 University of Wisconsin-Madison 空间科学中心访问学者,主要从事精细光谱探测与计量分析技术、水环境光学遥感技术研究。E-mail: yutao@opt. ac. cn