

高闯, 方新, 李彬, 等. 航空光电载荷实时控制系统设计与实现[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(10): 117-122. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 25070402

航空光电载荷实时控制系统设计与实现

高 闯¹, 方 新², 李 彬¹, 王潇逸¹

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2 中国人民解放军 93110 部队, 北京 100843)

摘要: 本文设计并实现了一种基于 FC-AE-ASM 协议的航空光电载荷实时控制系统, 系统以 FC-AE-ASM 协议为核心通信方式, 结合 CameraLink 图像采集卡完成高帧率图像采集与处理, 实现闭环控制下的实时目标跟踪功能。系统通过 Qt 的跨平台特性与模块化设计, 集成了通信管理、图像处理、数据存储与可视化分析功能, 具备高效、稳定、易扩展的特点。实验结果表明, 该系统能够满足航空光电载荷检测的实时性与可靠性需求, 为复杂环境下的设备测试提供了有效解决方案。

关键词: 实时控制系统; FC-AE-ASM 协议; 模块化; 闭环控制

中图分类号: TP311 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)10-0117-06

Design and implementation of real-time control system for aviation optoelectronic load

GAO Chuang¹, FANG Xin², LI Bin¹, WANG Xiaoyi¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2 Unit 93110 of PLA, Beijing 100843, China)

Abstract: This paper designs and implements a real-time control system for aviation optoelectronic load based on FC-AE-ASM protocol. The system uses the FC-AE-ASM protocol as the core communication method and combines the Cameralink image acquisition card to complete high frame rate image acquisition and processing, achieving real-time target tracking function under closed-loop control. The system integrates communication management, image processing, data storage, and visual analysis functions through Qt's cross platform features and modular design, and has the characteristics of high efficiency, stability, and easy scalability. The experimental results show that the system can meet the real-time and reliability requirements of aviation optoelectronic load detection, providing an effective solution for equipment testing in complex environments.

Key words: real-time control system; FC-AE-ASM protocol; modular; closed-loop control

0 引言

航空光电载荷是现代军用飞机作战系统的重要组成部分, 是无人机、航天器的重要感知设备, 集光学探测、实时处理于一体的机载智能感知系统。光电载荷的性能直接影响任务执行效果。随着科技的进步, 光电载荷不仅要成像清晰, 定位准确, 还要结合实时图像实现跟踪功能。这就需要利用通信和实时图像实现闭环控制。

光纤通道(Fiber Channel, FC)作为高速信息交换转网络, 用于机载设备间的数据交互, 凭借其高性

能、低延迟、抗干扰行强等优势已经在航电系统内部得到了广泛使用^[1-2], 替代了传统的 RS232、RS422、ARINC429 等通信方式。传统航空光电载荷控制系统已经无法满足光电载荷的控制和检测要求。

针对以上光电载荷控制和要求, 亟需研发一种新型的光电载荷实时控制系统。本文提出了一种基于 FC-AE-ASM 光纤通信协议以及 CameraLink 图像协议的设计方案, 并在 Qt 上完全实现了实时控制软件程序, Qt 框架凭借其跨平台性、丰富的图形库及信号槽机制^[3-4], 成为解决上述问题的理想选择, 并在某型号航空光电载荷上得到了验证。本文对设

作者简介: 高 闯(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向: 航空相机检测, 控制系统研发; 方 新(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航空装备技术; 李 彬(1987—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 航空相机控制。

通信作者: 王潇逸(1992—), 男, 副研究员, 主要研究方向: 航空相机控制。Email: wangxiaoyi@ciomp.ac.cn。

收稿日期: 2025-07-04

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

计实现的航空光电载荷实时控制系统进行全面测试与验证,以确保满足航空光电载荷实时控制需求,功能完备,性能稳定可靠。测试将围绕系统核心功能模块(FC-AE-ASM 光纤通信、CameraLink 图像采集与显示,闭环控制、数据实时解析显示、数据记录与分析、多线程架构)展开,涵盖了功能测试、性能测试、多线程架构与稳定性测试。

1 系统总体设计

1.1 系统架构

系统采用 FC-AE-ASM 光纤与 CameraLink 图像双协议融合架构,集成了通信数据管理、图像处理显示、数据存储与可视化分析功能、目标跟踪的闭环控制。因此系统规模比较庞大,故采用分层设计,分为硬件层、驱动层、数据处理层、业务逻辑层、人机交互层^[5],5 个层次之间关系如图 1 所示。

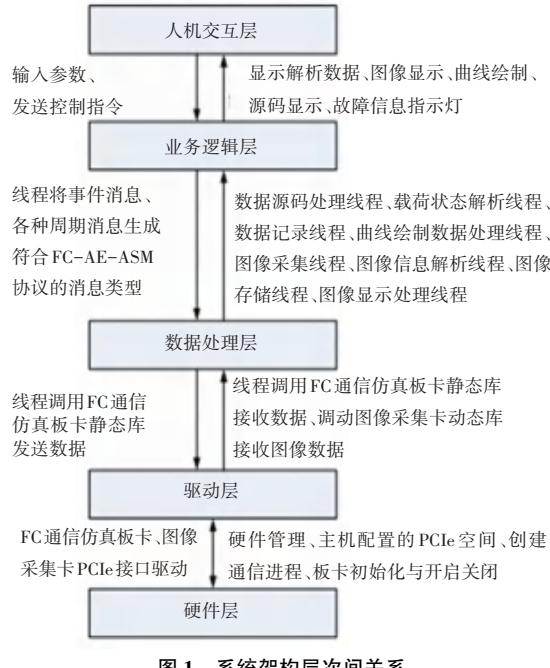


图 1 系统架构层次间关系

Fig. 1 Relationship between system architecture layers

(1) 硬件层。FC(源自光纤通道)技术是由美国工业标准协会(ANSI)于 1988 年提出的,旨在满足高速数据传输需求,后扩展至航空电子领域。FC-AE-ASM 是专注于匿名消息传输,通过无签名机制减少单点故障风险,适应航空电子环境的安全需求^[6-9]。

中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所研发的 2FIC(PCIe)标准仿真通信板卡是一种嵌入式 FC 接口单元,通过高速的 PCIe 总线接口与主机单元耦合,为系统提供高速 4GFC 接入和通信服务,满足高速、可靠的控制信息传输要求,且能其向

应用提供了符合 FACE 标准的 API 接口。软件接口与硬件接口协同完成网络接口的设备管理、通信管理、网络管理、时统管理、配置加载和中断处理等功能,满足用户对 FC 接口的应用需求。

CameraLink 是一种专为机器视觉和工业成像应用设计的高速串行通信协议标准,由美国自动化工业学会(AIA)制定并发布,该协议基于低压差分信号技术,主要用于工业相机与图像采集设备之间的高速图像传输。

Matrox 公司图像采集卡支持 6.8 Gbps 速率,满足高分辨率、高帧率的需求。采用差分信号技术抗干扰,而且还是标准的 PCIe 硬件接口^[10]。

工控机配备高性能多核 CPU、大容量内存、高速固态硬盘和至少 2 个 PCIe 插槽。

系统硬件组成如图 2 所示。

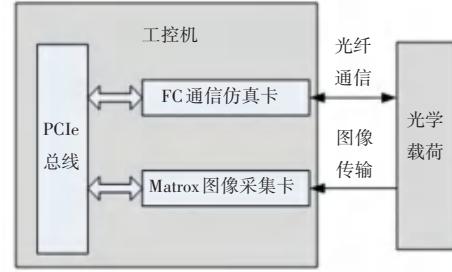


图 2 系统硬件组成

Fig. 2 Hardware composition of the system

(2) 驱动层。FC 仿真通信板卡和 Matrox 图像采集卡 PCIe 接口驱动、协议解析库。

(3) 数据处理层。调用 FC 仿真通信板卡和 Matrox 图像采集卡提供的静态库和动态库函数,实现基础的通信数据收发和图像数据的采集。

(4) 业务逻辑层。FC 通信接收数据解析、接收 Matrox 的 CameraLink 图像数据、FC 通信发送和接收数据存储与实时曲线绘制、故障诊断。

(5) 人机交互层。Qt GUI 界面,发送指令及参数控制区,FC 通信接收数据实时解析显示、实时图像显示、实时曲线显示,发送与接收源码实时显示,故障显示及记录。

1.2 多线程架构

航空光电载荷控制软件通信数据需实时收发、图像实时处理并显示,且 FC-AE-ASM 光纤通信方式会有各种周期消息和大量事件消息发送给航空光电载荷,界面更新频率高。多线程可充分利用多核 CPU 资源,减少等待时间,提高程序执行效率。在 GUI 程序中,多线程可保持界面响应性,避免因耗时操作导致界面卡顿。在资源管理方面,多线程共享

内存空间,能更高效分配资源。如果用单线程会导致数据处理陷入死循环,所有功能模块不能实现,从而造成界面卡死无响应。因此需要多线程实现各个模块功能,以保证软件运行流畅。相应地,为防止共享数据被修改,利用互斥锁将共享数据进行加锁和解锁操作^[11]。多线程设计是确保系统实时性、可靠性、高效性和稳定性核心技术。系统各线程间的关系如图 3 所示。

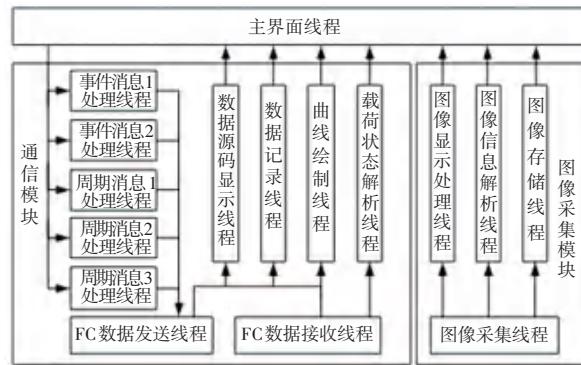


图 3 软件线程间关系

Fig. 3 Relationship between software threads

1.3 软件开发平台

Qt 提供了丰富的跨平台 C++ 图形用户界面应用程序开发框架,配备了众多模块,涵盖了 GUI 开发、通信处理、数据库访问、文件操作等,能够满足各种复杂的开发需求。Qt 的信号和槽机制是一种独特的对象通用机制,用于实现各个组件间的交互,这种机制简化了事件处理和组件间的通信,使代码更加清晰,可维护性好^[12-13]。

本文提出的航空光电载荷实时控制系统采用 Qt 应用程序开发框架和 MSVC2015 编译环境。

2 关键模块技术实现

2.1 高速通信模块

高速通信模(FC-AE-ASM)块是光电载荷实时控制软件的核心部分。系统调用 FC 通信仿真板卡驱动从而配置板卡参数,数据的收发是通过调用 FC 通信仿真板卡提供的静态库函数^[14]。具体实现方案如下。

(1) 板卡初始化。调用 FC 仿真通信板卡驱动,打开指定 PCIe 设备,配置主机的 PCIe 空间、配置 FC 仿真通信板卡参数,板卡初始化。

(2) 数据收发处理。创建独立的接收和发送线程来调用相应的静态库函数,接收线程实时读取数据,接收到数据发送给相应的线程进行数据处理。

数据发送线程实时判断消息队列是否为空,如果消息队列不为空则发送数据。由于 FC 通信方式数据量大而且需要同时接收和发送多种周期消息和事件消息,此方法可有效地防止发送和接收线程阻塞,确保数据的连续性和完整性。

2.2 图像采集与显示模块

图像采集线程将采集到的图像数据发送图像处理线程,最终显示在界面,具体实现方案如下。

(1) 采集卡初始化。配置 Matrox 图像采集卡分辨率、图像位深、触发模式等参数,保存配置好的 DCF 文件。

(2) 图像采集。调用 Matrox 图像采集卡保存的 DCF 文件及采集卡驱动提供的动态库,通过主动抓取方式获取图像帧,将图像放入图像帧队列,方便图像显示与存储。

(3) 显示处理。图像采集线程抓取实时图像成功后发送给图像处理线程,然后在主界面线程 QLabel 上实时显示,支持各种分辨率图像显示。图像注释信息经过解析后显示在图像上,包括飞机位置姿态、载荷状态等信息^[15-18]。图像显示功能如图 4 所示。



图 4 实时图像数据显示

Fig. 4 Real time image data display

2.3 闭环跟踪控制模块

闭环跟踪控制是光电载荷实现自动跟踪功能的重要部分,具体实现流程如下。

(1) 在光电载荷准备完成后进入成像模式,测试人员在人机界面点击“自动跟踪”按钮。

(2) 测试人员在实时图像界面发现目标并双击鼠标,判断双击鼠标时间间隔为 400 ms,点击目标设置为双击是为了避免测试人员未发现目标而碰触鼠标的误操作。

(3) 鼠标双击目标成功会有提示,软件将自动计算目标点与视场中心的像素偏移量 (x, y) ^[19]。随即把像素偏移量 (x, y) 封装成 FC-AE-ASM 协议指令,推送到发送消息队列中。

(4) 通信发送线程将其发送给光电载荷, 光电载荷图像处理模块目标识别后将脱靶量发送给载荷伺服模块, 载荷伺服机构驱动光学载荷锁定目标。

2.4 人机交互与数据管理模块

(1) 载荷实时状态监控。创建线程将接收线程发送过来的数据在该线程上根据通信协议进行实时解析, 使用 QTableWidgetItem、QLabel 等控制显示解析后的载荷状态参数(成像模式、温度、俯仰角等)、故障信息列表。利用 Qt 信号和槽机制, 数据解析线程发出解析后数据信号, 界面槽函数实时刷新供测试人员实时检测光电载荷状态^[20]。载荷解析实时部分数据如图 5 所示。

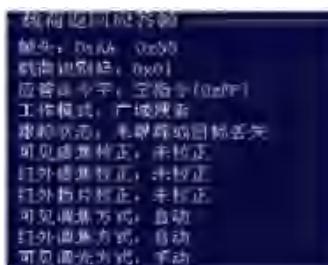


图 5 接收数据解析实时显示

Fig. 5 Real time display of received data analysis

(2) 原始数据显示与曲线绘制。光电载荷实时控制软件是模拟飞控系统和光电载荷进行数据交互。在光电载荷调试、生产过程中, 会有一些与预想不一致的情况, 这时就需要设计人员查看实时控制系统和光电载荷之间原始数据的交互来判断哪里出现了问题。软件将原始收发数据通过线程处理后以最直观的方式进行实时显示供设计和测试人员汇总分析, 显示界面如图 6 所示。



图 6 原始收发数据显示

Fig. 6 Display of raw transmission and reception data

光学载荷调试过程中, 会通过光电载荷状态变化趋势来判断载荷的功能。软件将 FC 通信收发数据解析后绘制为实时曲线, 并实现了曲线 Y 轴范围自适应算法, 以便操作人员直观查看光电载荷参数变化趋势。绘制实时曲线如图 7 所示。

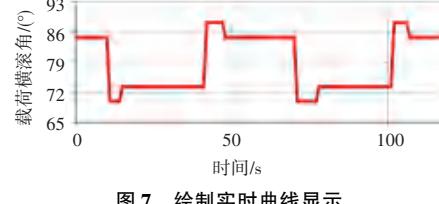


图 7 绘制实时曲线显示

Fig. 7 Real time curve display

(3) 数据记录。光电载荷在测试过程中为了避免不了载荷发生故障, 为了方便测试人员和载荷设计人员发现和排查故障, 创建线程将发送和接收数据的源码和解析后的数据存到 Excel 文档中, 方便测试设计人员后续查看载荷工作状态和故障排查。

(1) 基础数据收发测试。通过人机界面发送预定的控制指令到光电载荷, 验证载荷正确接收并响应(通过状态反馈确认)。同时, 接收载荷发送的状态信息、故障码等, 验证数据完整并正确到达实时控制软件。

(2) 实时数据显示测试。在数据显示界面上, 对解析后的载荷状态参数(成像模式、温度、俯仰角等)、故障信息列表, 进行实时刷新显示。

(3) 延迟测试。发送大量周期性数据包, 测量传输延迟(发送时间戳到接收时间戳)和吞吐量, 验证是否满足实时控制需求, 特别是闭环跟踪对延迟的敏感性。

(4) 异常处理测试。模拟光纤断开、光电载荷掉电等异常情况, 验证光电载荷实时控制软件是否能及时检测到链路中断并发出报警, 同时在链路恢复后能自动重连成功。

3.2 图像采集与显示功能

验证光电载荷实时控制软件通过 Matrox 图像采集卡同时接收、解析并实时显示可见光和红外图像的能力。

(1) 图像采集测试。向光电载荷发送成像指

令, 观察界面是否能稳定显示实时图像。检查图像清晰度、对比度、灰度范围是否正常, 是否存在丢帧、花屏、撕裂现象。

(2) 分辨率与帧率测试。光电载荷输出不同分辨率和帧率图像, 验证采集卡和软件能否正确识别配置并稳定采集显示, 帧率显示值是否与实际输出一致。

3.3 闭环跟踪控制功能测试

验证在跟踪模式下, 系统能够根据操作员指令在实时图像上点击目标, 计算目标偏移量, 并通过 FC-AE-ASM 协议准确、及时地发送给光电载荷, 触发光电载荷的跟踪动作。

(1) 目标选择与偏移量计算测试。在实时图像显示界面上, 用鼠标双击一个目标, 观察界面是否实时显示点击位置坐标并计算出目标相对于视场中心的偏移量。确认计算的偏移量被正确封装成预定义的 FC-AE-ASM 跟踪指令消息发送给光电载荷。

(2) 指令传输与载荷响应测试。通过实时状态信息或直接观察光电载荷伺服机构动作, 确认载荷收到了指令并开始向指定偏移位置运动。测量从鼠标点击到消息指令向光电载荷发送成功是否存在延迟。

3.4 数据实时解析与显示功能测试

验证系统能够实时解析接收到的 FC-AE-ASM 协议数据(载荷状态、故障信号等), 并在人机界面上以直观、可读的方式实时刷新显示。

(1) 状态信息显示测试。向光电载荷发送不同的指令消息和参数消息, 验证界面相应控件(文本框、指示灯、仪表盘等)是否立即更新为正确值。

(2) 刷新率测试。发送高频率更新的状态数据, 验证界面显示刷新是否平滑、无滞后、无丢失数据现象。

(3) 显示正确性测试。对比解析后的显示值与光电载荷发送给实时控制系统原始数据值, 确保解析数据正确无误。

3.5 数据记录与分析功能测试

验证系统能够可靠地记录原始通信数据、解析后的数据, 并能进行可视化分析和导出。

(1) 原始数据记录测试。开启原始数据记录功能。向光电载荷发送整个工作流程, 待流程结束, 停止记录, 检查生成的原始数据和解析后的数据文件, 确认其包含所有收发的 FC-AE-ASM 数据帧, 时间戳信息完整。

(2) 曲线分析功能测试。验证曲线图是否支持缩放、平移、光标读数、Y 轴取值范围自适应等基本操作, 方便用户观察细节和数据变化趋势。

3.6 多线程架构与性能稳定性测试

验证基于 Qt 多线程(接收队列线程、发送队列线程、数据处理线程、UI 线程)的设计能有效避免数据丢失、处理延迟和界面卡顿, 保证系统在高负载下的稳定运行。

(1) 高负载通信测试。配置光电载荷持续高速发送大量周期和事件消息(远高于正常速率)及图像数据。同时, 操作员在界面上频繁发送控制指令和进行目标跟踪操作。观察接收队列是否有效缓冲了涌入的数据, 未发生溢出丢失。发送队列是否保证指令有序、及时发送。

(2) 界面响应测试。界面是否始终保持流畅, 无卡顿、冻结现象。数据显示刷新是否依然及时。

(3) 数据处理测试。数据解析、图像处理是否存在延迟显著增加但最终能处理完队列数据(无持续积压)现象。

(4) 资源监控测试。在上述高负载下, 持续监控各线程的 CPU 占用率, 检查是否存在某个线程长期独占 CPU 导致瓶颈。监控内存使用, 确保无内存泄漏(长时间运行后内存稳定)。

(5) 长时间运行稳定性测试。让系统在模拟正常负载甚至稍高负载下连续长时间工作。观察系统是否出现内存泄漏(内存占用持续增长)、线程崩溃或僵死、通信中断或图像采集异常、界面卡死无响应、记录功能失效或文件损坏。

以上验证测试结果见表 1。

表 1 系统验证测试结果

Table 1 System verification test results

功能项	测试项目	测试结果
通信功能	基础数据收发	数据正确
	实时数据显示	显示正常
	大量数据延迟	<10 ms
	异常处理	<4 h 自动重连
图像采集	图像采集	图像正常
	分辨率与帧率切换	正确
闭环控制	偏移量计算	<2 Pixel
	指令传输	<5 ms
数据解析显示	数据显示	显示正确
	刷新率	5 120×4 096@40 Hz
数据记录分析	数据正确性	正确
	原始数据记录	记录完整正确
	解析数据记录	记录准确
	曲线分析	显示正常 Y 轴自适应
多线程架构与性能稳定性	高负载通信	数据未溢出
	界面响应	正确流畅
	数据处理	处理队列无积压
	资源监控	无内存泄漏
	稳定性	连续工作 12 h 正常

综上所述,系统测试验证充分,证明了所设计的航空光电载荷实时控制系统满足航空光电载荷检测需求,具有较高的可靠性和实用性,达到预期目标。

4 结束语

本系统成功构建了一个基于 Qt 的高性能、多功能航空光电载荷实时控制平台,通过 FC-AE-ASM 高速通信、Matrox 的 CameraLink 图像采集、通信与图像的实时闭环控制、多线程的数据处理以及可视化分析功能,满足了现代光电载荷复杂的地面测试与故障诊断功能需求,系统的模块化设计和多线程架构确保了其可靠性,为光电载荷的研发、生产和维护提供了有力支持。以后需改进可实现通讯协议的协议解析模板,支持 Excel 配置文件动态加载,快速适配多种型号的光电载荷,减少新型号光电载荷实时控制系统开发周期。

参考文献

- [1] 花文波,赵斌,何燕春,等. 航电系统 FC 网络通信可靠性研究 [J]. 电子与通信技术, 2024(8):142-145.
- [2] 孟博,张楠,王晨博. 基于消息 ID 的机载 FC 网络监控系统设计 [J]. 无线互联科技, 2022(2):47-48.
- [3] 孙洁茹,陈晓宁,王健,等. 基于 Qt 的探测器温控上位机软件设计 [J]. 安徽大学学报, 2022,46(1):61-69.
- [4] 刘艳芳,侯钰龙,李莹洁,等. 基于 Qt 的跨平台液漏监测系统设计 [J]. 电子器件, 2024,47(1):274-278.
- [5] 戴美玲. 基于 CMOS 微处理器的实验室监控智能控制系统设计 [J]. 智能计算机与应用, 2023,13(7):85-88.
- [6] 朱志强,王世奎,李成文,等. 综合化航电系统中统一网络技术分析 [J]. 航空计算技术, 2022,52(3):125-129.
- [7] 崔萌,王健雄,汪智超,等. 面向 FC 网络的通用监控器设计与应用 [J]. 直升机技术, 2023(4):64-67.
- [8] 薛楠,王晓华,徐文进,等. 一种基于 FC 总线的三层组播通信功能设计和实现 [J]. 航空计算技术, 2022,52(3):70-73.
- [9] 李炎,王伟,张绍源,等. 线路保护光纤通道异常分析与处理 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2021,26(4):66-69.
- [10] 孟博,徐玉洁,冯思桐. 一种支持 PCIe 和 PCI 主机接口的模块测试平台设计 [J]. 无线互联科技, 2022(4):50-51.
- [11] 卢亚辉,张梅,和飞飞,等. 多源数据智能处理系统的设计与实现 [J]. 智能计算机与应用, 2023,13(7):163-167.
- [12] 王明峰,戴懿,周南平,等. 基于 Qt 的压力容器检测系统 [J]. 科技与创新, 2024(11):129-131.
- [13] 康谦泽,李佳林,李佳萌,等. 基于 Qt 的埋设机探测器上位机设计与实现 [J]. 工业控制计算机, 2022,35(5):13-17.
- [14] 白焱,杨继国,孙万禄,等. 一种基于事件触发光纤通信网络时钟同步设计 [J]. 飞机设计, 2022,42(2):54-57.
- [15] 徐晓婷,腾杰. 无人机侦察图像实时展示方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2024,33(5):137-140.
- [16] 刘爽利,黄雪莉,刘磊,等. 光电载荷下的红外和可见光图像融合综述 [J]. 计算机工程与应用, 2024,60(1):28-39.
- [17] 张佳,冯婕,张骏鹏,等. 基于目标图像块激活的航空图像目标检测技术研究 [J]. 航空科学技术, 2025,36(3):111-118.
- [18] 贲畅,陈晓露,閻家亮,等. 分布式光电协同图像综合处理技术 [J]. 红外, 2023,44(5):8-14.
- [19] 梁嘉琪,刘庆伟,缪菊,等. 某机载发射装置自动化故障检测系统的设计 [J]. 自动化应用, 2025,66(11):208-212.
- [20] 贾兆辉,朱镭,金明鑫,等. 无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析 [J]. 应用光学, 2024,45(5):930-936.