

一种面向太阳系边际探测的智能信息处理系统设计

丁运来¹, 孙振阳¹, 何张煜^{1,2}, 杜易¹, 王诗良¹, 张天柱^{1,2}

(1. 深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 合肥 230026)

摘要: 太阳系边际探测任务面临通信时延长、环境复杂、任务周期长等挑战, 对探测器的在轨自主数据处理与科学目标识别能力提出了更高要求。为此, 设计并实现了一种智能信息处理系统, 该系统采用国产高可靠宇航级人工智能(Artificial Intelligence, AI)芯片Yulong810A, 结合双现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)架构, 具备多源信息融合处理、图像预处理与目标检测等核心功能。针对弱光复杂环境下的目标感知难题, 系统集成融合了低光照增强模块的轻量级目标检测算法, 并引入加权框融合策略, 显著提升了检测精度与鲁棒性。软件系统采用分层架构设计, 支持上注更新、容错控制与多任务协同处理。测试结果表明, 该系统在目标检测准确率、工程参数下载稳定性及中断处理效率等方面表现优异, 为太阳系边际探测任务提供了关键的技术支撑。

关键词: 太阳系边际探测; 智能信息处理; 目标检测; 软件架构设计

中图分类号: V448.22+4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0510-14

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250034

引用格式: 丁运来, 孙振阳, 何张煜, 等. 一种面向太阳系边际探测的智能信息处理系统设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 510-523.

Reference format: DING Y L, SUN Z Y, HE Z Y, et al. Design of an intelligent information processing system for solar system boundary exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 510-523.

引言

太阳系边际探测是指对距离太阳约80~150 AU的太阳系边缘地带, 涵盖日球层顶及更远的星际空间进行的科学探测, 对于太阳系的起源、演化历程, 以及揭示太阳风和星际介质的相互作用机制意义重大^[1-3]。近年来, 随着航天技术的不断发展, 太阳系边际探测已成为各国在深空探测领域的重要目标与方向。

自20世纪70年代起, 美国先后实施了“先驱者10/11号”(Pioneer 10/11)、“旅行者1/2号”及“新视野号”(New Horizons)等任务, 率先开启了太阳系边际探索^[4-6]。欧洲科学家则提出了“星际日球层顶探测器/日球层边界探索”(Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Explorer, IHP/HEL)任务计划, 旨在探索星际日鞘层, 了解太阳风与星际介质的相互作用^[6-7]。中国近年来也启动了“太阳系边际探测任务”论证工作, 目标是在2049年实现探测器抵达距离太阳100 AU的太阳系边际, 并在途中实施对大行星、半人马座小天体等的多目标探测任务^[8]。

与一般的深空探测任务不同, 太阳系边际探测面临通信时延长、环境复杂、任务周期长等挑战, 对探

测器自主性、可靠性、数据处理能力要求极高^[9-11]。传统探测方式依赖地面测控与离线数据处理, 难以满足太阳系边际探测任务对实时性、低带宽和高自主性的需求。多源信息处理技术能够实现粒子、磁场、光学等多源数据的在轨融合, 有效提升探测器的自主性和可靠性, 使其更好地应对复杂未知的环境。同时, 在太阳系边际探测任务中, 可能存在诸多高价值科学目标, 如典型天体、尘云、河外背景光等^[11-12], 如图1所示。



图1 太阳系边际探测过程中的高价值科学目标
Fig. 1 High-value scientific goals in the process of solar system boundary exploration

为了在轨实时识别和分析这些高价值目标, 亟需开发一个适用于太阳系边际探测的智能信息处理系统。该系统将部署轻量化目标检测算法, 具备多源载荷信息处理功能, 能够实现科学数据的在轨实时处理与特征提取, 从而降低对地面支持的依赖, 优化数据传输效率, 最大化科学产出。

1 智能信息处理系统

1.1 智能信息处理系统定义

智能信息处理系统是指在航天器平台上, 通过集成高性能计算硬件与智能算法, 实现对在轨多源载荷数据的自主感知与高效处理的技术体系^[13]。

该系统应具备环境感知能力, 能够实时采集并融合遥感图像、导航信息、遥测参数等多源异构数据, 随后通过预处理模块完成多源数据融合、几何校正及与数据压缩等, 以提升后续分析与决策的精度与可靠性^[14-15]。在此基础上, 系统采用深度学习等智能算法对目标特征进行精准提取, 并构建任务驱动的知识生成与推理模块, 支持航天器自主执行故障检测、任务规划与轨迹优化等关键决策过程^[16-17]。

1.2 主流的智能信息处理方案

当前航天领域的智能信息处理方案呈现出异构化、模块化以及智能化的显著趋势, 计算单元通常由中央处理器 (Central Processing Unit, CPU)、数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP)、现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 及专用人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 加速芯片 (如神经网络处理器 (Neural Processing Unit, NPU) / 张量处理器 (Tensor Processing Unit, TPU)) 等多种处理器构成^[18-25]。

例如, “玉兔号”月球车采用 CPU + DSP + FPGA 的

架构, 实现在轨环境感知与导航避障功能^[18]; “祝融号”火星车采用类似的架构, 具备环境感知、导航规划以及图像压缩能力^[19-20]; 美国的“毅力号” (Perseverance) 火星车采用抗辐射强化的 RAD750 CPU, 具备 2 GB 内存和 256 MB 随机存取存储器 (Random Access Memory, RAM), 搭载 Xilinx V5 FX70T FPGA, 其视觉计算单元在位置变化检测速度上比“好奇号” (Curiosity) 提升 18 倍。这种组合确保了火星车在火星极端环境中的可靠运行^[21-22]; 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 的 Φ-Sat 卫星搭载了高光谱相机和人工智能芯片, 用于监测植被和水质变化等。其在轨数据处理平台运行深度神经网络, 自主识别高光谱图像中的云层并过滤, 减少数据传输量。该平台采用 Intel Movidius Myriad 2 视觉处理单元 (Vision Processing Unit, VPU), 具备计算机视觉和图像信号处理硬件加速块, 可提供 1 TFLOPS (1 TFLOPS = 1 万亿次/s) 的低功耗 AI 算力, 满足机器学习算法的运算和存储需求^[23]。美国的低地球轨道充气式减速器飞行试验 (Low-Earth Orbit Flight Test of an Inflatable Decelerator, LOFTID) 采用 CPU + GPU 架构, 用于图像编码和目标识别。其飞行软件基于核心飞行系统 (core Flight System, cFS) 架构, 具备任务导航等功能。硬件上配备抗辐射的商用现货 (Commercial Off-The-Shelf, COTS) 组件, 如基于 Power Architecture 的单板计算机, 满足任务需求^[24]。中国的“吉林号”光谱 01 和 02 星采用 DSP + FPGA 架构, 专注于目标检测任务。长光卫星技术有限公司研发的在轨智能处理系统, 以德州仪器公司 (Texas Instruments, TI) 的宇航级 SMV320 C6727B DSP 作为主运算单元, Xilinx 公司的 V5FX70T FPGA 作为协处理器, 完成高密度运算和接口逻辑, 具备云雾检测、船舶识别等功能, 且支持在轨更新^[25]。主流航天信息处理系统架构如表 1 所示。

表 1 主流航天信息处理系统架构
Table 1 Mainstream architecture of aerospace information processing systems

信息处理系统	场景	架构	功能	备注
玉兔号 ^[18]	月球探测	CPU + DSP + FPGA	环境感知、导航避障等	—
祝融号 ^[19-20]	火星探测	CPU + DSP + FPGA	环境感知、导航避障、图像压缩等	—
毅力号 ^[21-22]	火星探测	CPU (RAD750) + FPGA (Xilinx V5 FX70T)	着陆定位、环境感知等	计算机架构: 6U 处理器主频: 133 Mhz 背板通讯速率: 33 MHz/32-bit cPI
Φ-Sat ^[23]	地球观测	CPU + Myriad 2 VPU	目标检测、图像压缩等	在大约 1 W 的功耗下算力可达 TFLOPS 级别
LOFTID ^[24]	近地轨道飞行试验	CPU + GPU	图像编码、目标识别等	算力 1.26 TFLOPS
“吉林号”光谱 01 和 02 星 ^[25]	地球观测	DSP (SMV320C6727B) + FPGA (Xilinx V5FX70T)	目标检测等	算力 1.5 GFLOPS

1.3 太阳系边际探测智能信息处理需求

与常见的行星或近地深空探测任务相比,太阳系边际探测面临的物理环境和工程约束具有本质差异。其目标区域距离是火星或木星任务的数十倍,太阳光照强度随距离平方衰减至地球轨道的约 10^{-4} 量级,通信往返时延超过28 h。与此同时,探测器通常需通过巨行星引力助推进入外层空间,在此过程中经历极强的电离辐射环境,其累积剂量可达数十至上百krad(Si),远高于行星轨道任务^[4-6,26]。这些独特条件决定了太阳系边际探测在技术上具有区别于其它天体探测的典型难点:通信不可实时、光照极弱、辐射强度高、能源受限且任务周期极长。

基于上述差异与设计约束,本文从通信、辐射、光照与能源4个方面,对太阳系边际探测所面临的主要技术挑战进行定量分析,为后续系统方案的设计提供依据。

1) 通信时延极长且带宽受限。由于信号传播速率受光速限制,在100 AU(1 AU $\approx 1.496\times 10^{11}$ m)距离上单程时延超过13.9 h,长时延与带宽受限使地面无法实现实时任务干预,探测器必须具备自主任务规划与容错决策能力^[2,9]。

2) 辐射与高能粒子环境复杂。“旅行者”系列探测结果表明,日球层顶区域因太阳磁场屏蔽作用减弱,银河宇宙射线通量显著增强^[27-28]。对太阳系边际探测任务而言,更具决定性影响的辐射源来自木星借力段,其强电离环境在适度屏蔽下电离总剂量仍可能超过100 krad(Si)^[26]。该阶段形成任务的辐射基线,使单粒子翻转与锁死等效应显著增加。因此,探测器必须具备高抗辐照、容错与长期可靠运行能力,以应对极端粒子辐射环境。

3) 光学成像信噪比极低。由于太阳照度仅为地球轨道的0.01%,且星际尘埃散射与宇宙射线噪声显著,探测器获取的光学图像信噪比极低,目标亮度接近噪声水平^[6,9-10]。因此探测器需具备低光照增强与鲁棒目标识别能力,以确保有效科学数据的自动筛选与压缩传输。

4) 能源受限与任务周期长。太阳系边际探测任务通常采用放射性同位素热电发电机(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)供电,其初始输出功率仅数百瓦并随时间衰减。例如,“新视野号”使用1台GPHS-RTG提供约200~240 W电力,7台科学仪器总功耗仅28 W,却完成了冥王星及柯伊伯带探测^[29-30]。在此功率约束下,单载荷可用功率在10 W左右,任务周期又可达30~50 a,因此探测器必须具备低功耗与长期可靠运行能力。

综上所述,太阳系边际探测任务在通信、辐射、光照与能源等方面的极端约束,对多源载荷智能信息处理系统提出了多维度的性能要求。系统需具备:在长时延条件下实现自主任务规划与容错恢复;面向高辐射环境的抗辐照与在轨自检能力;在极低信噪比条件下完成光学图像增强与目标识别;在功耗受限条件下实现高效的AI计算与多源数据融合。上述需求构成了后续硬件架构、算法与软件系统设计的总体技术出发点。

2 架构设计

2.1 硬件系统架构设计

面向太阳系边际探测任务,硬件设计需在极端环境下实现长期稳定运行。为适应高辐射、低能耗与难以维护的任务特性,系统需具备自主管理、容错恢复与在轨可重构能力。基于这些需求,本文提出“高可靠、低功耗、可重构”的多源载荷智能信息处理系统架构,以支撑探测任务的长期自主运行与智能感知。

在系统芯片选型方面,深空探测任务的特殊环境决定了器件需同时具备高计算性能、抗辐照能力与宽温度适应性。目前,国产AI芯片产业在商用领域已形成成熟生态,以寒武纪、华为海思等为代表的企业在高性能AI加速方面取得显著成果。然而,宇航级AI芯片由于需满足极端环境下的可靠性、冗余与长期寿命要求,仍是国内技术的关键短板。珠海航宇微电子有限公司在该领域率先实现了AI芯片的工程化应用,其自主研发的宇航级芯片产品已在卫星图像处理与星载智能计算任务中得到应用,填补了国内在高可靠AI处理器领域的技术空白^[31-33]。

本研究采用航宇微公司国产化Yulong810A芯片作为核心处理器。该芯片具备卓越的AI加速能力,定点运算性能达12 TOPS,浮点运算性能为64 GFLOPS,典型功耗仅约6 W,能效表现优异。其工作温度范围覆盖-55~125℃,可满足深空探测的热环境要求。根据第三方检测结果,Yulong810A的总剂量耐受能力超过100 krad(Si),单粒子锁定阈值高于82.7 MeV·cm²/mg,单粒子翻转阈值介于6.02~22.2 MeV·cm²/mg之间,充分满足复杂空间辐射环境的使用要求^[33]。

信息处理单元采用3U板卡尺寸设计,实现结构紧凑与高集成度的平衡。其核心SoC芯片选用Yulong810A,负责执行星载智能算法。扩展接口采用SRAM型FPGA实现,用于高速数据预处理与任务分发;FLASH型FPGA负责接口控制与系统管理,支持在轨重配置与程序加载。系统硬件总体架构如图2所示。

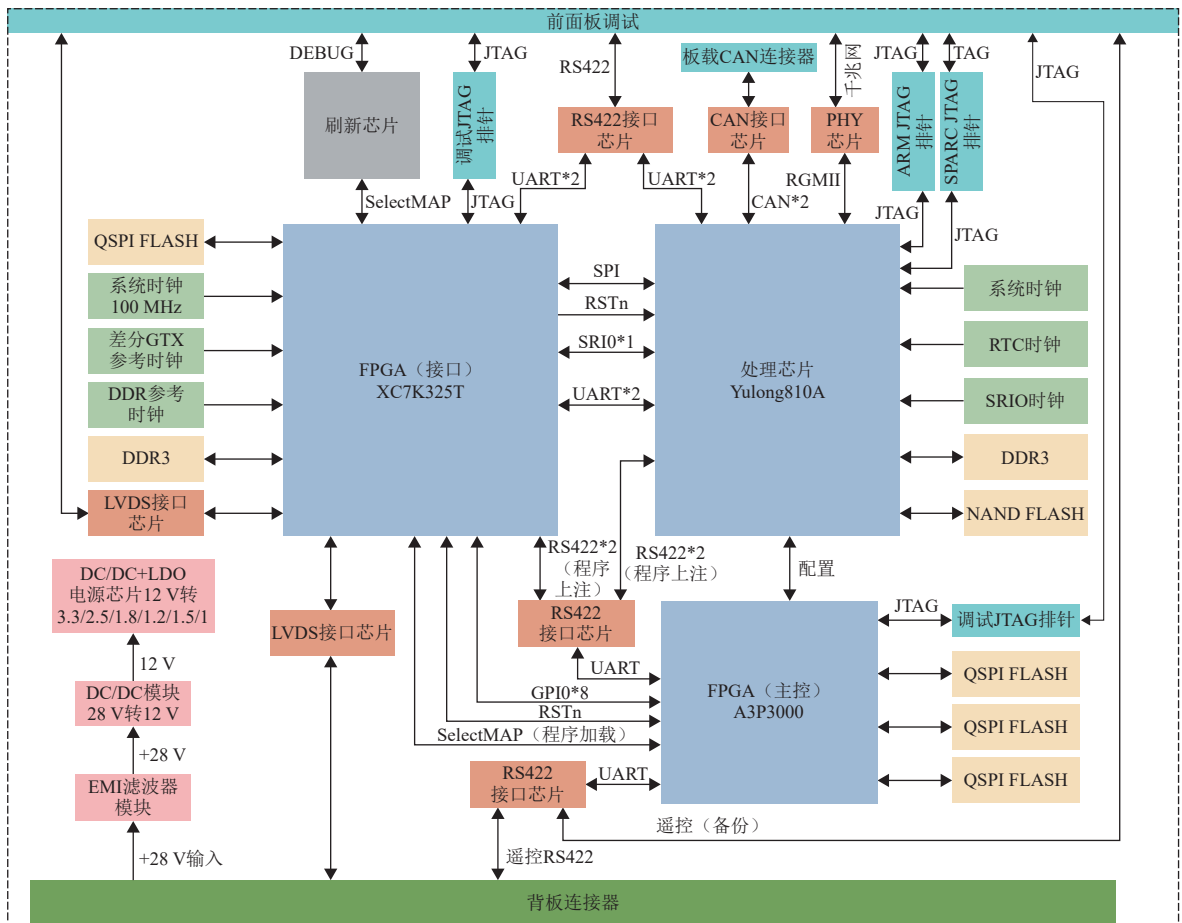


图2 系统硬件架构框图

Fig. 2 System architecture block diagram

智能信息处理单元平台采用双FPGA + AI芯片的异构架构, 主要由AI处理器芯片、信息处理电路与接口控制电路3部分组成。其中, AI芯片负责执行目标检测与智能识别算法; 信息处理FPGA实现相机图像数据的接收、缓存与分发; 接口控制FPGA负责测控数据传输及在轨程序重载。该架构在保证高可靠性的同时实现了低功耗、高并行度与可重构性, 为后续算法与软件系统的星载实现提供了坚实的硬件基础。

2.1.1 AI处理芯片电路设计

本方案系统采用的Yulong810A芯片主频为900 MHz, 内置1 MB高速静态随机存取存储器 (Static Random-Access Memory, SRAM), 并外扩72位2 GB DDR3内存, 为在轨程序运行与数据存储提供支持。芯片支持3路外部输入时钟: 24 MHz单端时钟用于CPU系统主时钟, 100 MHz差分时钟用于驱动PCIe接口, 125 MHz时钟则用于串行 RapidIO (Serial RapidIO, SRIO) 高速互联。为满足调试与维护需求, 系统外接RS422芯片和以太网物理层芯片 (ethernet PHYsical layer chip,

PHY), 实现多种调试方式; 同时引出两路联合测试行动组 (Joint Test Action Group, JTAG) 接口, 分别用于ARM内核与SPARC内核的在线调试。

Yulong810A与接口控制FPGA (型号 A3P3000) 之间通过外部存储器接口 (External Memory Interface, EMI)、与非型闪存 (NAND Flash, NAND)、通用异步收发传输器 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)、通用输入输出 (General-Purpose Input/Output, GPIO) 及复位信号实现互联。其中, Yulong810A经由A3P3000的EMI接口连接3片BPI FLASH, 用于存储SPL-UBOOT、UBOOT、KERNEL以及设备树等系统启动文件; 同时, Yulong810A还借助接口控制电路的NAND接口连接一片NAND FLASH, 用于存放根文件系统、应用程序、库文件及用户数据。

Yulong810A与信息处理FPGA之间可通过SRIO、UART、GPIO接口发起直接内存访问 (Direct Memory Access, DMA) 传输, 用于图像数据的传输与信息交互, 如图3所示。以SRIO接口为例, 其传输时序如下: Yulong810A发起DMA请求信号至FPGA, 该信号有效

后, FPGA响应并准备数据传输。随后, Yulong810A发送地址信息至FPGA, 指定数据存储或读取位置。FPGA依据接收到的地址, 将数据打包准备传输。在数据传输阶段, SRIO接口以高速串行方式将数据从FPGA传输至Yulong810A, 传输速率可达数Gbps。数据传输完成后, FPGA发送传输完成信号至Yulong810A,

完成一次DMA传输周期。在该图中, 应用程序通过命令函数发送命令开启DMA传输数据后, 等待驱动上报input事件; 当应用层接收到input事件, 说明DMA传输数据完成。其中SRIO适用于高速大数据块场景, UART适用于低速控制或小数据量交互, 两者均通过DMA大幅减少CPU干预, 提升异构系统的协同效率。

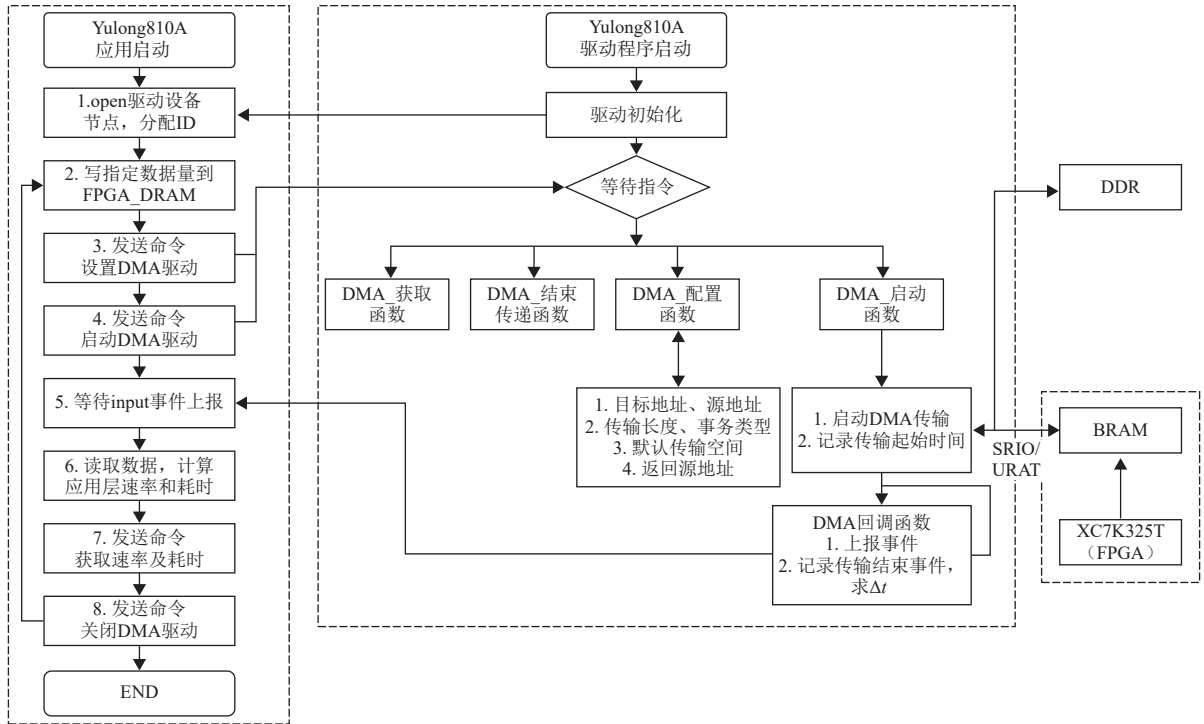


图3 DMA传输流程图

Fig. 3 DMA transfer flowchart

2.1.2 接口控制电路设计

接口控制FPGA最小系统核心功能包括: 实现与Yulong810A外接FLASH存储芯片的直通访问、主备份切换、三模冗余管理及在上线上注与刷新; 该系统还负责控制外部看门狗, 管理电源上下电时序与整板低功耗状态; 同时对外提供两路RS422通信接口和两路JTAG调试接口, 芯片选型为A3P3000。

2.1.3 信息处理电路设计

信息处理FPGA电路主要负责图像数据的接收、存储、预处理与传输, 并支持程序刷新与重载功能。信息处理FPGA芯片选用JFM7K325T型FPGA, 该型号已在星载智能图像处理平台及“北斗”导航基带处理单元等多项任务中得到应用。图像数据通过LVDS接口从载荷平台接收, FPGA外接2 GB DDR3存储器用于图像缓存; 程序刷新功能通过JFMRS01RH刷新芯片和外接的两片BPI FLASH实现, 保障系统可靠更新与维护。

2.2 目标检测算法设计

2.2.1 目标检测算法方案

太阳系边际探测任务中, 在轨图像处理面临极低光照、强噪声与受限带宽等环境约束, 传统图像增强与目标检测算法在此条件下难以稳定工作。受功耗和算力限制, 复杂的深度网络难以直接在轨实时运行, 因此必须构建轻量化、鲁棒性强、可在低功耗平台高效执行的智能感知算法。

基于上述需求, 本文在多源载荷智能信息处理单元上部署了轻量化目标检测算法, 用于初步识别典型天体、小天体、卫星等高价科学目标。该算法在设计上充分考虑了边际探测环境的光照、噪声与通信约束, 以在有限计算资源下实现在轨智能识别与自主筛选。

然而, 深空环境复杂多变且目标数据稀缺, 使得目标检测仍面临显著挑战: 一方面, 有限的样本难以全面覆盖不同目标类型与姿态; 另一方面, 探测对

象常处于暗弱光照条件下, 特征提取难度较大。为缓解数据不足带来的限制, 本研究选取SNCOVT (Space Non-Cooperative Object Visual Tracking Dataset)^[34]作为训练与验证的主要数据集。该数据集在模拟深空环境下采集, 涵盖C型小行星 (C_asteroid)、S型小行星 (S_asteroid)、卫星 (Satellite)、太空碎片 (Space Debris) 4类非合作目标, 以及接近、离开、飞越、固定轨道观察、灵活轨道观察5种运动模式, 具有良好的代表性和挑战性。SNCOVT 数据集共包含60个双目视频序列, 总计54 742帧; 针对本文任务, 从中选取8 461张图

像, 按8:1:1比例划分为训练集、验证集和测试集。

在算法设计上, 本文在速度与精度之间进行权衡, 采用轻量化YOLOv5s^[35]作为核心骨干网络。该模型具有较强的多尺度特征提取能力和优良的实时性能, 同时对计算资源需求较低, 适合部署在资源受限的星载平台。针对暗弱光照条件下的特征提取难题, 我们在YOLOv5s的基础上引入了PEyolo^[36]、SCINet^[37]、Retinexformer^[38]和IAT^[39]等低光照增强模块, 以强化目标的边缘与纹理信息感知, 提升检测鲁棒性。目标检测算法框架如图4所示。

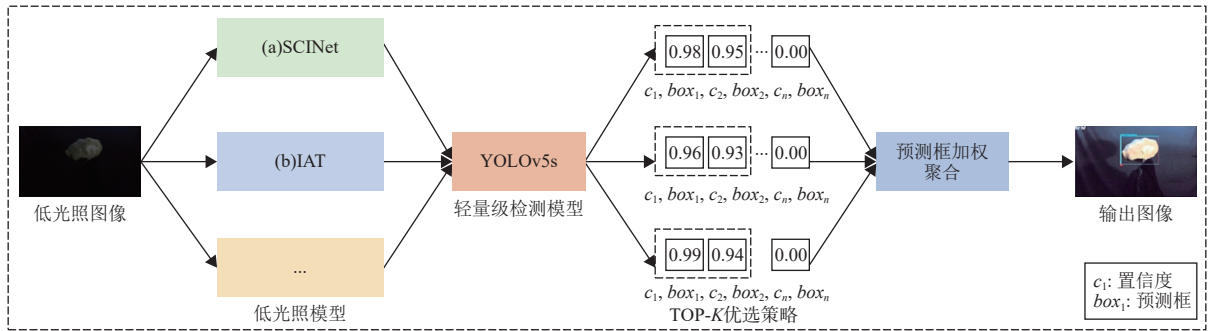


图4 目标检测算法框架

Fig. 4 Framework of object detection algorithm

为提升整体检测的稳定性, 本文设计了加权框融合算法 (Weighted Boxes Fusion, WBF)。该方法首先对所有候选检测框 $[B_1, B_2, \dots, B_n]$ 按置信度排序, 并进行动态聚类。当某一检测框与已有聚类的平均交并比 (Intersection Over Union, IOU) 大于阈值时, 将其纳入该聚类; 否则新建聚类。随后, 对聚类内的检测框进行加权融合, 其位置坐标 B_f 由各检测框坐标 B_i 以归一化置信度 w_i 为权重进行加权平均得到

$$B_f = \sum_i^m w_i B_i, \quad w_i = \frac{c_i}{\sum_{j=1}^m c_j} \quad (1)$$

其中: B_i 为当前聚类中第 i 个检测框的坐标; m 为当前聚类内检测框的数量; w_i 表示第 i 个检测框在融合中的权重, c_i 为当前聚类中第 i 个检测框的置信度, 对每个聚类进行置信度加权平均后进行置信度调整, 计算调整后的置信度 c_f 为聚类内各置信度的加权平均

$$c_f = \sum_i^m w_i c_i \quad (2)$$

这样便得到了加权融合后的检测结果。该策略能够充分利用不同模型预测结果中的空间位置信息, 抑制单一模型的不确定性, 从而获得更为稳定和精确的检测结果。

在两张RTX 4090 GPU上完成了训练与推理, 并通过优化得到适用于深空探测任务的轻量化检测模型。

2.2.2 低光照增强

在弱光环境下, 图像往往存在亮度不足、噪声增强和细节丢失等问题, 给目标检测算法性能带来显著挑战, 以经典图像低光照增强模型SCINet^[37]为例, 其主要基于光照-反射分离理论, 将输入低光照图像 I 分解为光照分量 (环境光照分布) 和反射分量 (目标清晰细节), 二者满足关系

$$I = z \otimes x \quad (3)$$

其中: \otimes 为逐元素乘法; z 为反射分量; x 为照明分量, 模型通过照度估计模块 $F(I)$ 优化照明分量 x , 进而恢复反射分量 z , 实现图像增强。

在照度估计模块中, 为渐进优化照明分量, SCINet采用多阶段训练流程, 各阶段共享照度估计模块 $F(I)$ 的网络结构与参数。以第 t 阶段($t = 0, 1, \dots, T-1$)为例, 初始阶段输入为原始图像 I (即 $x^0 = 1$), 模块计算逻辑为

$$F(x^t) \begin{cases} u^t = H_\theta(x^t) \\ x^{t+1} = x^t + u^t \end{cases} \quad (4)$$

其中: x^t 为第 t 阶段的照明分量; u^t 为模块 H_θ (含可学习参数 θ) 学习的“光照残差”, 即当前照明与理想照明的差异。通过残差学习, 降低直接估计照明分量的难度, 同时保证光照分布平滑, 避免目标区域过曝光。

在校准模块中,为实现“多阶段训练提精度、单阶段推理提速度”,原理图中自校准模块通过建立各阶段输入与原始图像 I 的关联,强制多阶段照明分量收敛。设第 t 阶段自校准后输入为 v^t ,模块计算逻辑为

$$G(x^t) \begin{cases} z^t = I \oslash x^t \\ s^t = K_\theta(z^t) \\ v^t = I + s^t \end{cases} \quad (5)$$

其中: \oslash 代表逐元素除法运算,通过该运算可从原始低光照图像 I 与当前阶段照明分量 x^t 中,恢复出第 t 阶段的反射分量 z^t ——反射分量直接对应探测目标的细节特征(如小行星纹理、尘云边缘),这一步操作能最大程度保留目标原始细节,避免后续校准过程中丢失关键信息; K_θ 是含可学习参数 θ 的参数化校正算子,由多个卷积层构成,其输出 s^t 称为“自校准映射”:该映射会捕捉反射分量 z^t 中“原始低光图像特征与当前阶段特征的差异”,例如当某区域因弱光导致反射分量细节缺失时, s^t 会生成对应的补偿信号,为后续输入校准提供精准依据。 v^t 是第 t 阶段校准后的输入,通过将自校准映射 s^t 叠加到原始图像 I 上,可使下一阶段的照明度估计模块 $F(v^t)$ 始终锚定原始图像的核心特征,避免多阶段计算出现偏差,最终保证各阶段照明分量逐步收敛。

得益于自校准模块的收敛特性,测试阶段无需多阶段计算,仅需调用单次照明度估计模块 $F(I)$,即可输出优化后的照明分量,结合 $z = I \oslash x$ 恢复清晰图像,满足探测任务在轨实时处理需求。

低光照增强算法框架如图5所示。

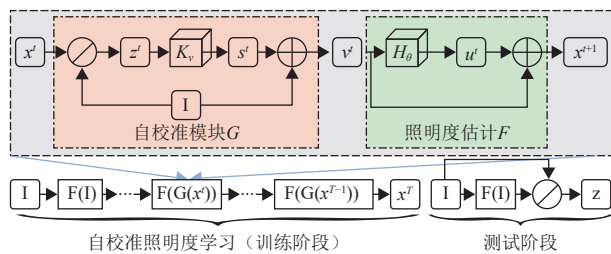


图5 低光照增强算法框架

Fig. 5 Low-light image enhancement algorithm framework

2.2.3 实验定量分析

本方案中所有模型均采用相同训练设置,训练初始学习率设定为0.000 5,批次大小为64,置信度阈值为0.25, IOU阈值为0.45。经过300个轮次的迭代训练后,在验证集上对模型性能进行系统评估,并以标准YOLOv5模型作为对照组。评估结果如表2所示,验证了模型在目标检测任务中的性能表现。

结果表明,各个模型在当前IOU阈值下具有较高的检测正确率。为进一步对比模型的检测精度和检测速度,从测试集和验证集中选取低照度测试子集(亮

度 < 20),对每个模型的平均IOU和平均推理速度进行测试,得到结果如表3所示。

表2 模型准确率指标验证

模型	P	R	mAP50	mAP50-95
YOLOv5	0.999	0.998	0.995	0.895
PE-YOLO	0.997	0.998	0.994	0.897
SCINet	0.997	0.998	0.995	0.904
IAT	0.997	0.998	0.995	0.908
Retinexformer	0.997	0.998	0.995	0.911

表3 模型性能对比

模型	IOU	FPS
YOLOv5	0.929 1	67.36
PE-YOLO	0.930 2	18.494
SCINet	0.934 0	55.670
Retinexformer	0.939 5	27.123
IAT	0.939 2	49.908

与基线模型相比,引入照度增强模块后的改进模型在IOU指标上均有所提升,验证了我们思路的有效性。其中SCINet和IAT在提升IOU的同时仍然保持着较高的推理速度,适用于实时检测任务的部署。

模型在推理阶段得到原始检测结果后,传统的后处理策略是进行非极大值抑制(Non-Maximum Suppression, NMS),将重叠检测框删除后得到最终的检测结果,这种方法较为粗略,没有充分利用检测结果的位置空间信息,因此采用“TOP-K + WBF”的策略,即对各单模性的输出结果按照置信度降序排列,取前K个检测结果后进行加权框融合,得到最终的检测结果。

为研究K的取值,采用IAT和SCINet进行消融实验(推理速度较快,能够高效得到实验结果),如表4所示。

表4 检测框数量消融实验

K	IOU	FPS	K	IOU	FPS
1	0.940 3	41.275	50	0.940 4	18.308
2	0.940 5	41.683	100	0.940 4	9.529
3	0.940 4	40.180	200	0.940 4	3.496
5	0.940 4	40.957	300	0.940 4	2.003
10	0.939 9	38.457	400	0.940 4	1.264

可以看出,在增大K的值时,K=2时IOU取得最大值,继续增大K,IOU不再发生变化,但FPS会急剧下降。可见,检测结果置信度最大的两个检测框具有最丰富的目标位置空间信息,置信度较低的检测框往往定位不准确,会对融合结果产生负面影响,而排名更为靠后的检测框置信度为0,加权融合时对目标的位置信息没有贡献,因此IOU在K=50后不再发生变化,但计算量会不断增加,因此FPS会急剧下降。需要注意的是,SNCOVT是单目标数据集,因此取K=2即可得到最佳融合效果,而在多目标检测场景,则需要对K的取值

进行适当调整, 一般取图像中目标数量的2倍为宜。

为了增强适应性, 本文的WBF算法支持任意数量、任意组合的模型进行加权融合。为研究不同模型数量对融合结果产生的影响, 以标准的YOLOv5s模型为基础, 添加不同数量的模型进行加权融合(保持 $K=2$), 结果如表5所示。

表 5 模型数量消融实验

Table 5 Ablation study of numbers of models

模型数量	IOU	FPS
2	0.933 7	18.268
3	0.936 8	16.209
4	0.939 2	14.378
5	0.940 5	10.958

随着模型数量的增加, IOU也不断提升, FPS则逐渐下降。可见增加模型数量能使模型融合获得多个模型的位置信息, 从而实现目标更精确的定位。而模型数量的增加也会带来计算复杂度的提升, 从而降低了检测速度。

对比表4和表5, 选取具有较高检测精度的IAT、SCINet进行模型融合, IOU指标与5个模型融合的结果相同, 而检测速度更快。因此在实时检测场景中, 一般选取检测性能良好且速度较高的模型进行WBF, 能够在保证检测效率的条件下实现高精度实时目标检测。

为进一步验证WBF策略在多目标场景的普适性, 以匹配太阳系边际探测中可能存在多目标共存场景需

求, 针对前述SNCOVT单目标数据集实验的局限性, 补充采用暗弱多目标专用数据集ExDark^[40]开展验证实验。ExDark数据集共包含7 363张低照度图像, 覆盖从超级弱光(亮度 < 5)到普通弱光(亮度 $20 \sim 50$)的10种光照条件, 涵盖12个类别, 可模拟深空探测中“暗弱背景、多目标分布”的场景特征。

实验保持与前述一致的超参数设置, 在验证集测试各模型基础检测性能, 结果如表6所示。由表可知, 相较于基线YOLOv5s模型(mAP50-95为28.7), 引入低光照增强模块的模型性能均有提升, 而基于WBF策略的融合模型性能表现最佳, mAP50-95达39.7, 充分证明所提方法在多目标暗弱场景下的检测精确性与优越性。

表 6 ExDark数据集上各模型基础检测性能对比

Table 6 Comparison of basic detection performance of different models on ExDark dataset

模型	mAP50-95
YOLOv5s	28.7
Retinexformer	33.1
PE-YOLO	30.0
IAT	35.4
SCINet	35.5
Ensemble (本文)	39.7

2.2.4 定性分析

为了更加直观地体现上述数据分析结果, 我们在各个检测类别中选取低照度输入, 对各模型的检测结果进行可视化, 结果如图6所示。



图 6 可视化结果对比

Fig. 6 Comparison of visualization results

图6中为不同模型对4个检测类别中的同一低照度输入的检测结果,红色边界框为真实标注(ground truth),图像下方分别为对应的IOU和FPS。根据结果分析可知,由于深空背景下的低照度环境和少样本数据,单模型推理性能波动较大,而加权融合方法能够利用来自不同模型的位置空间信息,具有更稳定、精确的检测性能。

2.3 软件架构设计

面向太阳系边际探测任务的长时延通信、高辐射环境及长期无人值守特点,软件系统在设计上重点满足任务自治、容错恢复与在轨更新三方面需求。多源信息处理软件运行于Yulong810A处理器上,作为智能信息处理系统的核心控制层,主要实现以下功能:

- 1) 在轨算法部署与更新管理。支持轻量化检测模型的在轨运行与参数更新,具备加载、校验与回滚机制,确保算法长期可靠执行;
- 2) 遥测与遥控任务处理。负责与地面系统的数据交互,实现指令接收、任务调度与遥测上报,保障任务可控与可观测;
- 3) 容错与异常恢复机制。针对单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)及程序异常,提供数据校验与自动恢复功能,提升系统稳定性与在轨可靠性。

2.3.1 软件框架设计

深空探测软件具有多任务功能交叉、信息流复杂等特点,设计合理的软件架构有利于提升软件各模块之间信息流传输效率及软件健壮性^[41]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开发了cFS软件架构,支持其相应深空探测任务的软件研制^[42-43];欧洲航天局(European Space Agency, ESA)研究了空间电子开放式接口架构(Space AVionics Open Interface aRchitecture, SAVOIR)^[44-45],以加强在航天器电子系统领域的标准化水平。国内高校与科研机构也开展了系列研究,共同推动该领域软件架构的发展。

本研究的软件系统采用分层式逻辑架构(如图7示),以实现高可靠性、可扩展性和跨平台移植能力。整体架构分为4个层次:设备层包括处理单元(Processing Unit, PU)以及通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)、看门狗(Watchdog)、闪存(Flash)、随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)等片上外设;操作系统层实现多任务管理、信号量管理、消息队列管理、定时器管理等功能,同时高可靠操作系统为实时处理软件平台提供内核加载、文件系统启

动、底层硬件驱动支持的功能^[46];中间件层实现通用软件操作的统一API接口管理,以适应后续可能的跨平台移植需求,用户只需更改中间件层代码即可实现应用层代码在不同硬件平台上的复用;最顶层的应用层实现探测任务的专用软件。



图7 软件系统整体架构

Fig. 7 Overall architecture of software system

根据多源信息处理软件的功能需求,可将软件配置项划分为通讯管理模块、周期任务模块、图像预处理模块、图像目标检测模块、在轨维护模块组成,各个软件功能模块具备高内聚、低耦合的特点,通过内部总线进行数据交互。

软件在轨系统工作模式包括上电自检模式、待机模式、图像检测模式,其中上电自检模式上电后自动进入,其余各工作模式的切换均由地面遥控指令发起,由模式切换管理模块完成。应用层软件模块数据流如图8所示。

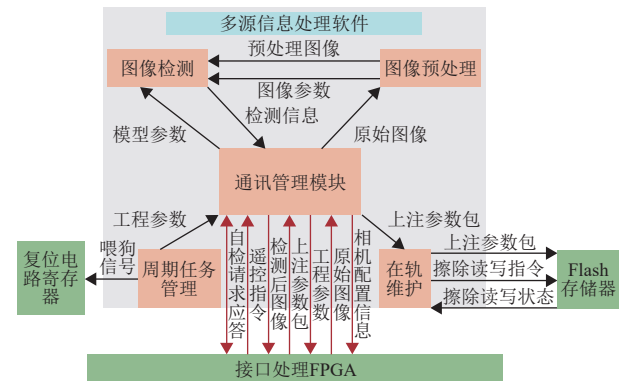


图8 应用层软件模块数据流

Fig. 8 Application layer software module data flow

各个软件模块可划分为3个任务,各个任务之间通过二进制信号量与任务优先级实现多任务之间的同步与互斥,具体关系如图9所示。

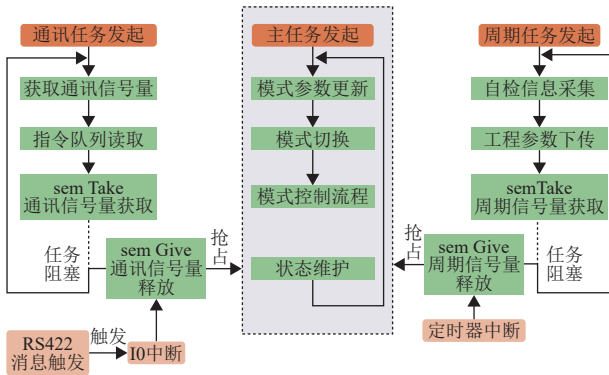


图 9 软件多任务划分
Fig. 9 Software multitasking partitioning

- 1) 主任务: 完成多源信息载荷的各模式的工作流程、目标识别推理、CPU看门狗“喂狗”操作等;
- 2) 消息通信任务: 从消息队列中读取和解析遥控指令消息, 更新模式控制参数和载荷控制参数;
- 3) 周期性任务: 根据配置的处理周期, 定时读取多源信息载荷各模块的自检信息和当前工作参数, 组合传输给载荷控制器的载荷工程参数并完成工程参数下载;
- 4) 任务抢占: 消息通信任务和周期性任务的优先级高于主任务, 当二进制信号量被释放时, 主任务被抢占并开始执行, 直到信号量再次被获取。

2.3.2 软件可靠性设计

软件可靠性一般是指在规定的条件下和规定的时间内, 软件无实效运行的概率^[47]。深空探测软件尤其强调可靠性设计, 主要通过冗余技术来实现, 以避免由于空间辐射引起的单事件干扰^[48]。除了选择符合规格的抗辐射组件外, 多源信息处理软件主要采用的可靠性设计包括:

- 1) 接口冗余: 载荷控制器与多源信息融合载荷之间通信接口的重要数据由三重冗余措施决定, 防止由于SEU引起的数据传输错误导致的指令丢失。
- 2) 重要数据冗余: 对于IO中断、定时器中断标志、主任务、消息通信任务和周期性任务循环标志, 不依赖于单一的0或1进行判断。同时使用三分之二投票机制来防止任务意外终止。
- 3) 重要配置寄存器检查和刷新: 科学探测载荷的主控软件定期读取Yulong810A的关键寄存器, 并将其与初始化的配置值进行比较。如果在比较过程中发现任何差异, 首先禁用CPU中断, 然后重新配置Yulong810A寄存器, 重新配置完成后, 再重新启用中断。
- 4) 看门狗管理: 在程序的主循环中, CPU看门狗寄存器定期设置为重载值。当程序由于内部或外部因素崩溃并无法生成看门狗喂狗信号时, CPU会执行硬

件重置以重新加载主控制软件。

5) 在轨权重完整性巡检: 为应对空间辐射导致的AI模型权重单粒子翻转风险, 系统通过定时器周期触发权重完整性巡检任务。采用CRC32算法对DDR3中的权重数据进行分块校验, 并与Flash中的基准校验值比对; 当检测到不一致时, 自动启动冗余恢复机制, 从Flash 3份物理隔离的镜像文件中选取最新同步数据覆盖异常区域, 经二次校验确认有效性后恢复运行。同时将异常信息记录并下传地面, 提升权重文件在复杂空间环境下的存储可靠性。

6) 在轨更新安全自愈策略: 启动程序或数据在轨更新时、在地面段生成更新数据包时, 使用专属私钥对数据包标识序号SHA-256哈希值进行RSA-2048签名^[49], 在平台接收端对签名信息解码, 并计算原始数据包哈希值, 仅当签名信息比对一致时, 才允许执行后续更新操作; 同时结合空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)“在轨软件版本管理”规范^[50], 通过“唯一版本标识+版本逻辑校验”防止非法回滚; 最后更新前自动备份当前可执行文件, 更新失败时触发三级自愈(即时回滚快照→超时强制恢复→切换备份版本), 实现“来源可验、版本可控、故障可恢复”的在轨更新安全策略。

3 系统平台构建与测试

3.1 系统平台搭建

智能信息处理平台测试环境如图10所示, Yulong 810A处理器和接口处理FPGA集成在智能信息处理板上, 采用数字可调电源对板卡进行28V供电, 上位机和板卡之间通过千兆以太网通信, 传输上下行指令和图像检测信息。



图 10 智能信息处理系统实物图
Fig. 10 Physical diagram of intelligent information processing system

3.2 目标检测算法部署测试

本研究在目标检测任务中采用优化后的YOLOv5算法, 并在软件图像检测模块中实现其在轨部署。该模块依据深度学习模型的推理与后处理流程, 对网络

输出张量进行解析,从而获取高价值目标的空间坐标与置信度信息,并将结果输出至上位机进行可视化显示。

目标检测算法的整体部署流程如下:

1) 模型加载与图构建:在系统中创建网络模型实例,并基于OpenVX框架生成计算图,实现各网络层的节点化映射。

2) 模型校验:对神经网络图进行完整性与节点连接关系验证,确保计算流程正确可执行。

3) 输入预处理:对采集的图像执行尺寸缩放、通道变换与归一化操作,并通过软件接口将数据传输至片上NPU的张量处理单元。

4) 推理执行:调用软件接口触发NPU推理任务,完成模型的前向计算并输出结果张量。

5) 结果后处理:解析输出张量中的目标框坐标、尺寸及置信度信息,执行非极大值抑制(Non-Maximum Suppression, NMS)等步骤以去除冗余检测框,最终生成目标检测结果。

3.3 软件性能指标测试

为了确保信息处理单元与载荷控制器之间的正常通信以及软件系统本身的正常运行,有必要基于智能信息处理单元与上位机仿真软件对软件功能和性能进行测试,主要设计功能与性能指标与测试方法如表7所示。

表7 软件功能与性能设计指标

Table 7 Design indicators for software functionality and performance

指标	数值	描述
工作模式切换	—	工作模式可以由上位机软件自由切换
工程参数下传	—	工程参数可以通过RS422总线下传至上位机软件
图像检测准确率	>90%	软件接收上位机发送的测试图像,多个类别图像下mAP(均值平均精度)大于90%
NPU平均占用率	<90%	软件在进行目标检测算法推理时NPU占用率小于90%
工程参数下传周期	4 ± 0.1 s	两次工程参数下传间隔为4 s,误差小于0.1s
中断处理时间	10 ms	软件中断处理时间小于10 ms
看门狗喂狗周期	<1 s	两次软件看门狗喂狗时间间隔小于1 s

1) 工作模式切换测试

在上位机测试软件中设置待机模式、检测模式、自检模式和校准模式指令,并通过RS422总线接口发送至综合信息处理板,观察调试串口打印信息中工作模式是否切换成功。

2) 工程参数下传测试

在工作模式正常切换的情况下,设置不同软件工

作模式和工作参数,并观察下传工程参数对应字段是否与设置值一致。

3) 工程参数下传周期测试

在上位机测试软件中持续记录1 h内智能信息处理软件通过RS422总线下传的工程参数接收时间,并计算工程参数下传的平均间隔时间。

4) 图像识别准确率测试

在上位机测试软件中将系统切换至图像检测模式,连续输入 N 张测试图像,由信息处理软件完成识别并记录结果。统计识别正确的图像数量 T ,计算图像识别准确率为 T/N 。

5) NPU占用率测试

在连续图像推理过程中运行占用率监测脚本,以1 ms间隔采样NPU使用率,推理结束后计算平均占用率,反映模型推理阶段的算力利用水平。

6) 中断处理时间测试

在智能信息处理软件的中断服务例程中断服务例程(Interrupt Service Routine, ISR)中,使用操作系统的时间戳API函数接口来获取中断服务例程进入和退出的时间戳,并计算中断处理时间。

在洁净厂房对智能信息处理单元板卡进行了功能性能测试,测试结果如表8所示。

表8 软件测试环境与测试结果

Table 8 Software testing environment and testing results

测试机型号	Lenovo ThinkCentre M70a Gen5
测试机操作系统	Windows 10 Professional
被测设备	智能信息处理板卡
被测软件	智能信息处理软件
工程参数下传周期/s	设计值: 4 ± 1 实测值: 4.01
中断处理时间/ms	设计值: 10 实测值: 3.4
目标识别准确率/%	设计值: >90 实测值: 94.8
NPU平均占用率/%	设计值: <90 实测值: 86.3

4 结束语

本文围绕太阳系边际探测任务对高自主、高可靠在轨信息处理能力的迫切需求,设计了一套基于国产Yulong810A AI芯片与双FPGA异构架构的智能信息处理系统。该系统通过多源信息融合与图像预处理模块,结合融合低光照增强模型的轻量化目标检测算法与WBF后处理策略,有效攻克了极弱光照环境下目标特征提取与检测稳定性难题。在软件层面,采用分层架构并集成了多任务调度、多重容错控制及安全在轨

更新机制,为系统在长期无人值守任务中的可靠运行提供了核心保障。经实验验证与系统测试,本系统在目标检测准确率(94.8%)、工程参数下传周期稳定性(4.01 s)及中断响应效率(3.4 ms)等关键指标上均达到或优于设计预期,校验了整体方案的有效性。

需要指出的是,本研究基于地面数据集进行算法验证,与真实太空环境中的太阳风等离子体散射、高能粒子噪声等复杂因素存在差异,可能导致信噪比评估不够充分。展望后续工作,将致力于通过在轨动态标定建立噪声补偿模型,并引入在线域适应技术,使模型能持续自适应真实探测环境,从而进一步提升系统在极端条件下的感知鲁棒性与任务自主性。

参考文献

- [1] 吴伟仁,于登云,黄江川,等. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学:信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.
- [2] 徐瑞,李世震,李朝玉,等. 太阳系边际探测器自主技术需求分析[J]. *宇航学报*, 2024, 45(5): 647-660.
- [3] 田百义,王大轶,张相宇,等. 太阳系边际探测飞行任务规划[J]. *宇航学报*, 2021, 42(3): 284-294.
- [4] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. Voyager 1 explores the termination shock region and the heliosheath beyond[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2017-2020.
- [5] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. An asymmetric solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 71-74.
- [6] 张爱兵,李晖,孔令高,等. 太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 545-553.
- [7] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MCNUTT R L. The interstellar heliopause probe/heliospheric explorer: IHP/HEX[C]//Proceedings of AIP Conference. [S. l.]: AIP Publishing, 2010: 655-658.
- [8] 张佳文. 太阳系边际探测任务轨道优化设计[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
- [9] 张哲,唐玉华,郑祚修,等. 太阳系边际探测任务人工智能技术研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, 11(6): 523-537.
- [10] ZHANG Z, TANG Y H, ZHENG Z X, et al. Research on artificial intelligence technology for interstellar boundary exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(6): 523-537.
- [11] 王赤,李晖,郭孝城,等. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 517-524+535.
- [12] WANG C, LI H, GUO X C, et al. Scientific objectives of the interstellar boundary exploration project[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 517-524+535.
- [13] 曹知远,李翔宇,乔栋. 面向太阳系边际探测的多天体借力目标选择方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 536-544.
- [14] CAO Z Y, LI X Y, QIAO D. Target selection method for multi-body gravity-assist in interstellar boundary exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 536-544.
- [15] 大众科学编辑部. 太阳系边际探测人类认识宇宙的新窗口[J]. *大众科学*, 2022(10): 40-43.
- [16] Popular Science Editorial Office. A new window for mankind to understand the universe: Interstellar boundary exploration[J]. *Popular Science*, 2022(10): 40-43.
- [17] STRAUB J. A review of spacecraft AI control systems[C]//Proceedings of 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, Florida, USA: [s.n.], 2011.
- [18] JIANG X, SANG F, ZHOU J, et al. Satellite-based multisource trajectory fusion based on Ascend310 algorithm design and implementation[C]//Proceedings of Sixth International Conference on Geoscience and Remote Sensing Mapping (GRSM 2024). [S. l.]: SPIE, 2025, 13506: 125-134.
- [19] CHAO W, JISHUANG Q, ZHI L. Data fusion, the core technology for future on-board data processing system[J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(1): 264-270.
- [20] CHEN H L, SUN Q Y, LI F F, et al. Computer vision tasks for intelligent aerospace perception: an overview[J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(9): 2727-2748.
- [21] THANGAVEL K, SABATINI R, GARDI A, et al. Artificial intelligence for trusted autonomous satellite operations[J/OL]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 144: 100960. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042123000763>.
- [22] 陈建新,张志,王磊,等. 嫦娥三号巡视器综合电子系统的设计与实现[J]. *中国科学:技术科学*, 2014, 44(5): 450-460.
- [23] CHEN J X, ZHANG Z, WANG L, et al. Design and implementation of integrated electronic system for Chang'e-3 rover[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(5): 450-460.
- [24] 毛晓艳,苗志富,陈建新,等. “祝融号”火星车立体视觉算法并行设计与实现[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(2): 202-210.
- [25] MAO X Y, MIAO Z F, CHEN J X, et al. Parallel design and implementation of stereo vision algorithm for Zhurong Mars rover[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(2): 202-210.
- [26] 朱剑冰,徐勇,王翠莲,等. “祝融号”火星车图像压缩软件的设计与实现[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(5): 503-510.
- [27] ZHU J B, XU Y, WANG C L, et al. Image compression software design for Zhurong Mars exploration rover[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(5): 503-510.
- [28] JOHNSON A E, AARON S B, ANSARI H, et al. Mars 2020 lander

- vision system flight performance[C]//Proceedings of AIAA SciTech 2022 Forum. [S. l.]: AIAA, 2022: 1214.
- [22] SETTERFIELD T P, CONWAY D, CHEN P T, et al. Enhanced Lander Vision System (ELViS) algorithms for pinpoint landing of the mars sample retrieval lander[C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2024 Forum. [S. l.]: AIAA, 2024: 0315.
- [23] 唐磊, 马钟, 李申, 等. 天基智能计算技术现状与发展趋势[J]. *微电子学与计算机*, 2022, 39(4): 1-8.
- TANG L, MA Z, LI S, et al. Current status and development trends of space-based intelligent computing technology[J]. *Microelectronics & Computer*, 2022, 39(4): 1-8.
- [24] 常耀予, 刘昕, 刘飞, 等. 美国充气减速飞行器近地轨道飞行试验分析[J]. *中国航天*, 2023(5): 67-73.
- CHANG Y Y, LIU X, LIU F, et al. Analysis of near-Earth orbit flight test of American inflatable decelerator[J]. *Aerospace China*, 2023(5): 67-73.
- [25] 王家耀, 颜军, 吴佳奇, 等. AI技术赋能遥感卫星数据在轨处理[J]. *测绘科学技术学报*, 2024, 40(6): 571-590.
- WANG J Y, YAN J, WU J Q, et al. AI technology enabling on-orbit processing of remote sensing satellite data[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2024, 40(6): 571-590.
- [26] 王颖, 张焯, 任德鹏, 等. 太阳系边际探测任务辐射效应综合分析[J]. *宇航学报*, 2024, 45(2): 295-302.
- WANG Y, ZHANG H, REN D P, et al. Comprehensive radiation effects analysis of exploration to the boundary of the solar system[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(2): 295-302.
- [27] LUO X, POTGIETER M S, ZHANG M, et al. A numerical simulation of cosmic ray modulation near the heliopause. II. Some physical insights[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 826(2): 182. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/826/2/182/pdf>.
- [28] 王玲华, 宗秋刚, 任杰. 太阳系边际的能量粒子探测[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 567-573.
- WANG L H, ZONG Q G, REN J. Energetic particle detection at the boundary of solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 567-573.
- [29] STERN S A. The New Horizons Pluto Kuiper belt mission: an overview with historical context[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140(1): 3-21.
- [30] ROGERS G D, FLANIGAN S H, STANBRIDGE D. Effects of radioisotope thermoelectric generator on dynamics of the new horizons spacecraft[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2014, 151: 801-812.
- [31] 吴佳青, 任大鹏. 我国人工智能芯片发展探析[J]. *中国工程科学*, 2025, 27(1): 133-141.
- WU J Q, REN D P. Development of Artificial Intelligence Chips in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(1): 133-141.
- [32] 前瞻产业研究院. 全球及中国人工智能芯片(AI芯片)行业发展前景展望与投资战略规划分析报告(2024) [R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2024.
- Qianzhan Industry Research Institute. Research on development prospects and investment strategy planning of global and China AI chip industry (2024)[R]. Shenzhen: Qianzhan Industry Research Institute, 2024.
- [33] 颜军, 唐芳福, 张志国, 等. 异构多核人工智能Soc芯片的低功耗设计[J]. *航天控制*, 2020, 38(2): 62-68.
- [34] ZHOU D, SUN G, SONG J, et al. 2D vision-based tracking algorithm for general space non-cooperative objects[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 193-202.
- [35] Ultralytics. YOLOv5[EB/OL]. (2020-05-27)[2025-05-1]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- [36] YIN X, YU Z, FEI Z, et al. Pe-yolo: Pyramid enhancement network for dark object detection[C]//Proceedings of International conference on artificial neural networks. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 163-174.
- [37] MA L, MA T, LIU R, et al. Toward fast, flexible, and robust low-light image enhancement[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022: 5637-5646.
- [38] CAI Y, BIAN H, LIN J, et al. Retinexformer: one-stage retinex-based transformer for low-light image enhancement[C]//Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 2023: 12504-12513.
- [39] CUI Z, LI K, GU L, et al. You only need 90K parameters to adapt light: a light weight transformer for image enhancement and exposure correction[C]//Proceedings of 33rd British Machine Vision Conference 2022. B.London, UK: BMVA Press, 2022.
- [40] LOH Y P, CHAN C S. Getting to know low-light images with the exclusively dark dataset[J]. *Computer vision and image understanding*, 2019, 178: 30-42.
- [41] 张红军, 李佳津, 于俊慧, 等. 深空探测器数据管理软件架构设计[J]. *航天器工程*, 2023, 32(5): 98-104.
- ZHANG H J, LI J J, YU J H, et al. Software architecture design for data management system of deep space explorer[J]. *Spacecraft Engineering*, 2023, 32(5): 98-104.
- [42] Goddard Space Flight Center. Core flight system, framework: operating system abstraction layer[EB/OL]. (2021-10-19)[2025-05-02]. <https://github.com/nasa/OSAL>.
- [43] Goddard Space Flight Center. Core flight system, framework: core flight executive[EB/OL]. (2021-10-19)[2025-05-02]. <https://github.com/nasa/cFE>.
- [44] SAVOIR Advisory Group. Introduction and status of SAVOIR[EB/OL]. (2021-10-20)[2025-05-02]. <http://savoir.estec.esa.int>.
- [45] ESA. OSRA-onboard software reference architecture[EB/OL]. (2021-10-19)[2025-05-02]. <http://essr.esa.int/project/osra-onboard-software-reference-architecture>.
- [46] 詹盼盼, 齐征, 张翠涛, 等. 支持多核处理器的星载分区操作系统设计[J]. *航天器工程*, 2020, 29(1): 47-52.
- ZHAN P P, QI Z, ZHANG C T, et al. Design of spaceborne partitioned operating system supporting multi-core processor[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(1): 47-52.
- [47] GOKHALE S S, TRIVEDI K S. Analytical models for architecture-based software reliability prediction: a unification framework[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2007, 55(4): 578-590.
- [48] 冯俊涛, 杨新年. 星载雷达主控软件设计与实现[J]. *舰船电子对抗*, 2017, 40(3): 86-88.
- FENG J T, YANG X N. Design and implementation of main control software for spaceborne radar[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2017, 40(3): 86-88.

- [49] WEISS H. CCSDS standardization of security algorithms for civil space missions[C]//Proceedings of SpaceOps 2012 Conference. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2012.
- [50] CCSDS. On-orbit software version management: CCSDS 502.0-B-3[S]. [S. l.]: CCSDS, 2020.

作者简介:

丁运来(1998-), 男, 工程师, 主要研究方向: 计算机视觉、深空智能

感知。

通信地址: 安徽省合肥市蜀山区中安创客二期F1栋(230031)

E-mail: dingyunlai@stu.ouc.edu.cn

杜易(1992-), 男, 工程师, 主要研究方向: 雷达数据处理、星载软件架构设计。

通信地址: 安徽省合肥市深空探测实验室(230031)

E-mail: sa514057@mail.ustc.edu.cn

Design of an Intelligent Information Processing System for Solar System Boundary Exploration

DING Yunlai¹, SUN Zhenyang¹, HE Zhangyu^{1,2}, DU Yi¹,
WANG Shiliang¹, ZHANG Tianzhu^{1,2}

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230031, China;

2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The solar system boundary exploration mission faces challenges such as long communication delays, complex environments, and long mission durations, which impose higher requirements on the detector's onboard autonomous data processing and scientific target recognition capabilities. To address these issues, this paper designed and implemented an intelligent information processing system. The system used the domestic high-reliability aerospace-grade AI chip Yulong810A, combined with a dual-FPGA architecture, and possessed core functions including multi-source information fusion processing, image preprocessing and target detection. To tackle the challenge of target perception in weak-light complex environments, the system integrated a lightweight target detection algorithm incorporating a low-light enhancement module and introduced a weighted boxes fusion strategy, significantly improving detection accuracy and robustness. The software system employed a layered architecture design, supporting uplink updates, fault-tolerant control and multi-task cooperative processing. Test results demonstrate that the system performs excellently in terms of target detection accuracy, stability in downlinking engineering parameters, and interruption handling efficiency, providing key technical support for the solar system boundary exploration mission.

Keywords: solar system boundary exploration; intelligent information processing; object detection; software architecture design

Highlights:

- For the solar system boundary exploration mission, a lightweight space intelligent information processing system based on dual FPGAs and the domestic Yulong810A AI chip was designed and implemented.
- A lightweight object detection algorithm was developed, integrating multiple low-light enhancement models, which significantly improved target recognition in low-illumination conditions.
- The software system designed possesses multi-task management, fault-tolerant control, and on-orbit update capabilities, significantly enhancing the system's reliability and task autonomy.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]