

一种深空探测任务分布式高集成载荷管理技术

谭羽茵, 薛长斌, 徐海涛, 赵勋峰, 孙阳

(中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 由于探测距离远、空间环境复杂, 深空探测飞行器在重量、体积、能源及数据传输等方面严重受限, 且传统的紧耦合载荷电子学集成方式无法满足深空探测需求的问题, 亟需轻小型、高集成的载荷管理单元, 实现自主探测管理与强抗辐照保护。提出分布式高集成载荷管理单元设计方案, 采用两级架构: 前端载荷信号处理单元就近布置于载荷探测前端, 实现载荷信号采集转换; 后端载荷信息管理单元不受安装位置限制, 负责复杂控制与大容量存储。其分布式、可扩展、高集成、通用化以及智能数据处理等关键创新技术, 为载荷提供多元集成方案, 显著增强了载荷系统的适应性与集成度, 弥补传统方式的不足。本研究可助力未来深空探测任务、深化宇宙认知, 为中国深空探测事业迈向新高度提供关键技术支撑。

关键词: 深空探测; 分布式; 高集成; 载荷管理

中图分类号: V4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0524-07

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250029

引用格式: 谭羽茵, 薛长斌, 徐海涛, 等. 一种深空探测任务分布式高集成载荷管理技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 524-530.

Reference format: TAN Y Y, XUE C B, XU H T, et al. A distributed and highly integrated payload management technology for deep space exploration missions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 524-530.

引言

深空探测作为人类叩响太阳系与宇宙大门的关键第一步, 承载着人类考察、勘探乃至定居地球外天体的伟大愿景, 是空间探索领域中最具挑战性的前沿阵地之一^[1]。开展深空探测活动, 既是航天技术迈向高阶发展的必由之路, 也是人类洞悉宇宙奥秘、解读太阳系密码、探寻地球与生命起源及演化轨迹、拓展科学认知边界的核心手段。

中国在航天事业上成绩斐然, “嫦娥一号”至“嫦娥六号”工程依次成功实施, “天问一号”火星探测任务圆满收官, 为中国深空探测筑牢根基^[2]。当下, “嫦娥七号/八号”工程以及“天问二号”小行星探测项目正稳步推进, 未来, “天问三号”火星采样返回、小行星防御计划、“天问四号”木星探测任务、太阳极轨探测、太阳系边际探测等也已纳入规划蓝图, 中国深空探测事业的征程正不断向着更为广袤无垠的宇宙深处延展。

深空探测器与地球轨道探测器之间存在着显著的本质差异。受限于遥远的探测距离与复杂的宇宙环境, 深空探测器在重量、体积、能源供应及数据存储

传输量等方面均面临着极为严苛的限制。同时, 其测控距离远, 测控窗口少, 数传带宽窄, 这就要求深空探测器必须具备高度智能决策数据处理流程, 以此适配充满未知与挑战的深空环境。此外, 深空探测过程中强烈的宇宙辐射, 对探测器提出了极高的抗辐照要求^[3]。面对如此复杂且严苛的条件, 为确保各类科学载荷稳定、高效运行, 亟需开展新型分布式高集成载荷管理技术研究。

1 分布式载荷管理需求分析

以往航天探测任务中, 为实现科学载荷与探测器平台的高效协同, 通过配置单台集中式载荷管理单元, 构建起统一化的管理架构。该架构通过整合各载荷的供配电控制、遥测遥控指令交互、数据采集传输、自主运行调度、健康状态监测及数据处理等核心功能, 有效简化了系统接口复杂度, 提升了功能集成度与运行可靠性, 同时降低了资源消耗。

然而, 受探测器工程约束影响, 各载荷需集中部署于面向探测目标的有限区域, 且高精度探测需求对载荷探测前端与电子学模块间的传输延迟、信号衰减

提出严格限制, 为此, 各载荷采用独立电子学, 且电子学近距于探测前端的布局策略, 将电子学设备与探测前端紧密耦合, 以保障数据采集的时效性与准确性。而载荷管理单元则可基于探测器整体结构进行灵活布局, 实现与探测前端的物理解耦。

随着航天任务面向更远距离、更长周期拓展, 对载荷系统轻量化、低功耗及高可靠性的要求持续提升, 自“嫦娥三号”任务之后, 载荷团队即开展了紧耦合载荷集成架构技术研究^[4-6]。该架构将传统载荷单机电子学功能进行精简, 仅保留前端控制与基础信号处理电路, 其余核心功能均集成至载荷管理单元。通过软件定义方式复用公共电路资源, 实现不同载荷的差异化管理与数据处理; 同时利用多终端冗余备份机制, 满足深空探测任务对长寿命、高可靠的严苛需求。此架构在降低系统重量、提升资源利用率方面成效显著, 为后续任务奠定了技术基础。

尽管紧耦合载荷系统集成方式已经大幅度降低了系统重量, 但因太阳系边缘探测等深远空间探测任务要严格控制重量与功耗以满足发射与能源供给约束^[7], 又需最大化扩展载荷种类以提升科学探测价值, 传统紧耦合架构的优化潜力逐渐触达瓶颈, 亟需突破现有技术框架, 在紧耦合架构基础上进一步深化集成设计。通过引入通用化分布式高集成载荷管理单元, 对各载荷的信号采集与数据处理模块进行归一化设计, 实现硬件资源的深度共享与动态调配。该方案不仅能够有效压缩单机电子学、电控箱的冗余, 还可通过灵

活重构适应多样化载荷需求, 为深远空间探测任务提供更具扩展性与适应性的载荷管理解决方案。

2 分布式高集成载荷管理单元设计

分布式高集成载荷管理单元采用创新的两级管理架构设计, 通过功能解耦与空间优化实现系统性能提升。前端载荷信号处理单元 (Signal Processing Unit, SPU) 就近安装于载荷探测前端, 构建起高效的信号采集与预处理, 提供基础公共供配电、高压转换、信号采集、数据转换和热控管理功能, 通过归一化设计统一规范各载荷的数据采集与处理流程, 同时, 针对深空辐射环境, SPU采用集中式辐射防护设计, 为内部公共电路及集成化载荷电子学提供探测任务全周期的辐射总剂量防护^[8], 确保系统在恶劣空间环境下的稳定运行。后端载荷信息管理单元 (Information Management Unit, IMU) 不受探测器局部空间限制, 可依据整体结构优化布局。作为系统核心中枢, IMU 承担着载荷自主运行控制、复杂数据处理及大容量数据存储等关键任务^[9], 通过标准化接口与SPU实现高速数据交互, 保障全系统数据处理的高效性与准确性。该分布式架构设计通过前后端功能协同, 在确保载荷信号完整性与探测精度的前提下, 显著降低系统重量与功耗; 同时, 通过模块化集成设计与冗余架构, 实现系统可靠性、集成度及辐射防护能力的全面提升, 为深空探测任务提供坚实的技术支撑。分布式高集成载荷管理单元如图1所示。

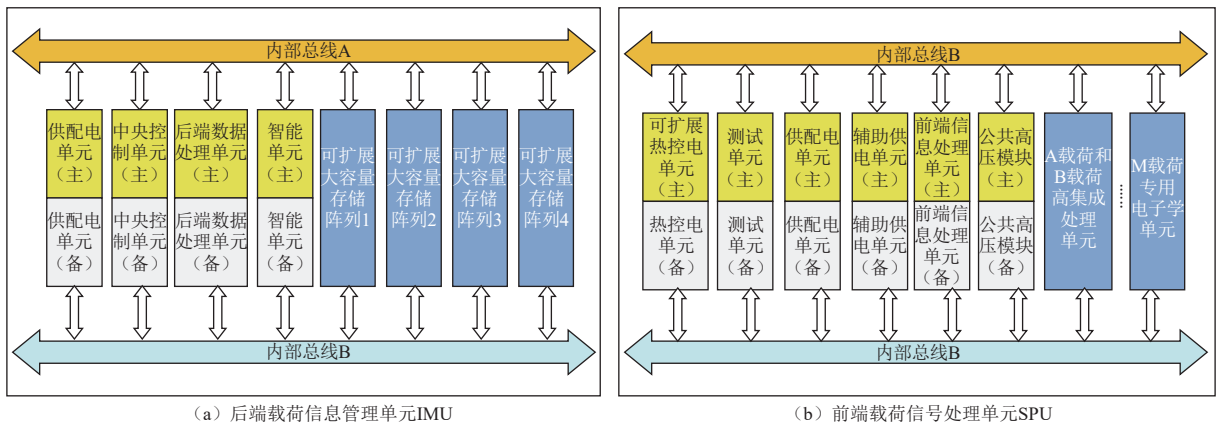


图 1 分布式高集成载荷管理单元组成框图

Fig. 1 Block diagram of the composition of the distributed and highly integrated payload management unit

后端信息管理单元IMU包括后端供配电单元、中央控制单元、数据处理单元、智能单元以及可扩展的大容量系统。

1) 后端供配电单元接收探测器平台的一次低压母

线, 经过霍尔电流采集电路、熔断器电路、浪涌抑制电路、EMI滤波器后、DC/DC变换得到+5 V、+3.3 V 等二次电源, 供后端载荷信息管理单元使用, 同时把经过浪涌抑制之后的一次母线电源和指令电源转至前

端载荷信号处理单元^[10]。

2) 中央控制单元是整个载荷管理单元的控制核心,以高性能高速CPU为运算核心,通过集成Nor FLASH、SDRAM、PROM等存储器件构建嵌入式计算机最小系统,通过1553B总线接口实现与外部接口控制。其中,Nor FLASH用于存储系统软件和应用软件程序,以及相关自主控制脚本参数,提供非易失性存储保障;SDRAM作为程序运行的动态内存空间,支持数据的快速读写操作,PROM则存储系统引导程序,确保设备启动过程的稳定性与可靠性,并支持对系统软件和应用软件的在轨更新。与探测器平台的交互通过1553B总线协议实现,作为远程终端(RT)节点接入探测器总线网络,确保与平台的高效数据通信与指令交互。针对载荷管理单元内部的前端信号处理单元、后端数据处理单元、大容量存储单元及智能控制单元,中央控制单元采用主从模式的RS422总线架构,以主端控制器身份统一管理各模块,通过标准化通信协议实现精准控制与数据传输,从而构建起层次分明、协同高效的载荷管理体系^[11]。

3) 后端数据处理单元承担着多模块协同控制与高速数据处理的核心功能。该单元实现对智能单元、可扩展大容量存储单元及前端信号处理单元的加电时序控制,确保各模块有序启动与稳定运行。在数据传输层面,其采用高速数据接口实时接收前端信号处理单元合路后的载荷科学数据,建立起高效的数据汇聚通道。在中央控制单元的统一调度下,后端数据处理单元执行双向数据交互任务:一方面,依据指令将接收到的数据分发至智能单元进行深度分析,同时将数据存储至指定的可扩展大容量存储单元;另一方面,按照任务需求从大容量存储单元快速读取数据,读取方式支持文件点播^[12]、时间点播、和数据类型点播,再通过三线制LVDS数传接口传输至探测器平台。

4) 大容量存储阵列采用双总线协同架构实现数据交互与功能扩展。在指令层面,通过RS422总线接收并解析NANDFLASH存储操作指令,执行数据读写擦除等操作;在数据传输层面,依托高速LVDS接口建立数据传输通道,实现载荷科学数据的高速写入与读取。该单元基于NANDFLASH存储介质,构建起大容量、可扩展的数据存储系统,支持多通道并行数据处理,确保海量探测数据的高效存储与快速调取。大容量存储单元使用标准化的RS422通信接口与LVDS数据接口,通过模块化设计实现大容量单元的灵活扩展,有效提升系统的扩展性与任务适应性。大容量存储阵列支持单板加电串行存储^[13],也支持多板加电并行存

储,确保数据的有序写入与读取,也可切换至多板协同的并行存储模式,通过多存储单元的同步工作显著提升数据吞吐效率。可根据实时数据流量动态调整大容量存储阵列的工作模式,实现存储性能与功耗的最优平衡,有效满足深空探测任务中数据量动态变化的存储需求

5) 智能单元接收载荷科学数据,聚焦于多源异构数据的深度挖掘与实时分析,设计兼具低模型复杂度与高效融合性能的轻量化卷积神经网络(CNN)模型^[14],突破传统算法在计算资源受限条件下的性能瓶颈,从多源载荷科学数据中在轨实时捕捉并精准识别科学探测关键事件,形成信息快报发至大容量系统,并以最高优先级下行到地面,在星地数传带宽受限、传输延时显著的严苛条件下,该机制可确保关键信息以极简编码快速下传至地面控制中心,为地面团队预留充足决策时间,实现观测任务的即时策略调整与科学目标的动态优化,显著提升深空探测任务的科学产出效率与响应敏捷性。

前端载荷信号处理单元包括前端供配电单元、辅助供配电单元、可扩展热控单元、前端信号处理单元、测控单元、以及置于前端集成的载荷专用电子学单元或高集成处理单元。

1) 前端供配电单元和辅助供配电单元接收后端信息管理单元的一次电和指令电,完成内部所需的二次电,同时针对各载荷需求,精准输出 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 12\text{ V}$ 、 $\pm 15\text{ V}$ 等多种规格的二次电源。各载荷有独立的继电器开关和熔断器的保护,确保供配电故障隔离,极大地提升了供电系统的安全性与稳定性。

2) 测控单元主要是以反熔丝FPGA为核心^[15],通过定制化的通信协议栈,实现与各载荷间稳定高效的RS422串行通信,确保数据传输的实时性与可靠性;依托高精度模拟前端采集电路,能够对关键模拟量进行快速、精准采集转换;同时支撑载荷开关机OC输出,实现对载荷开关机控制。该设计充分发挥反熔丝FPGA的抗辐射特性,有效保障深空探测任务中测控功能的可靠性与稳定性。

3) 可扩展热控单元采用高密度集成设计,可支持40路精准控温通道与40路实时测温通道,通过闭环反馈控制机制,能够对载荷各关键部位的温度进行定制化动态监测与调节,有效保障载荷系统的稳定运行与长寿命工作。

4) 信号处理单元将采集的各载荷信号数据合路后通过LVDS接口转发至后端载荷信息管理单元进行数据处理。

5) 针对载荷所需的专用电子学部分, 能够以独立电子学模块的形式, 高度集成到载荷信号处理单元设备内, 实现对特定功能的高效处理与精准调控。与此同时, 载荷管理单元特别配备了高集成处理单元, 将其作为通用化管理模块。高集成处理单元凭借高性能的硬件架构, 拥有高精度且高速的信号采集能力以及强大的数据处理能力, 适配不同类型数据通讯接口需求。其程序加载切换功能, 通过动态加载不同的处理程序, 可灵活调整工作模式, 进而支持多个载荷共用同一块高集成处理单元。这种设计不仅极大地提高了硬件资源的利用率, 降低了系统的复杂性和成本, 还显著增强了系统的可扩展性和适应性, 为多样化的载荷任务提供了坚实有力的技术支撑。分布式载荷管理单元载荷关系见图2。

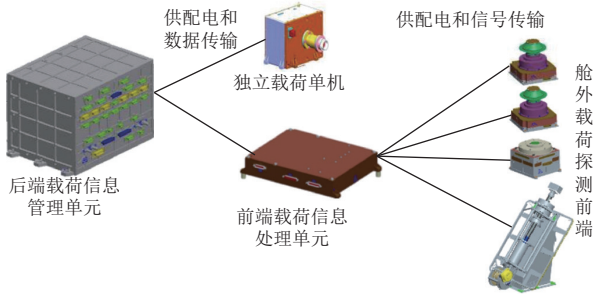


图2 分布式载荷管理单元载荷关系图

Fig. 2 Relationship diagram of the distributed payload management unit

3 分布式高集成载荷管理单元关键技术

分布式高集成载荷管理单元关键技术主要有4个: 分布式设计、可扩展化设计、高集成通用化设计、智能数据处理。

1) 分布式设计

相较于传统载荷管理单元设计方案, 分布式两级管理设计的优势极为突出。其前端载荷信号处理单元紧密贴合载荷探测前端布局, 此举极大程度缩短了信号传输路径, 有力降低了信号损耗, 有效规避了干扰风险, 进而显著提升了信号质量。与此同时, 前端信号处理单元能够高效完成载荷信号到数据的转换, 极大地优化了后续数据传输模式, 减少了线缆使用数量, 为分系统减轻了重量负担。此外, 该前端单元针对内部公共电路以及可集成的载荷电子学, 开展了集中辐射总剂量防护设计, 为系统在辐射环境中稳定运行筑牢根基, 极大地增强了系统的可靠性与稳定性。而后端载荷信息管理单元不受安装位置约束, 为系统布局赋予了极大的灵活性, 便于依据实际需求灵活调

整布局, 以适应多样化的应用场景。

2) 可扩展设计

大容量单元和热控单元采用标准化接口, 方便后续扩展, 可扩展大容量单元设计见图3。

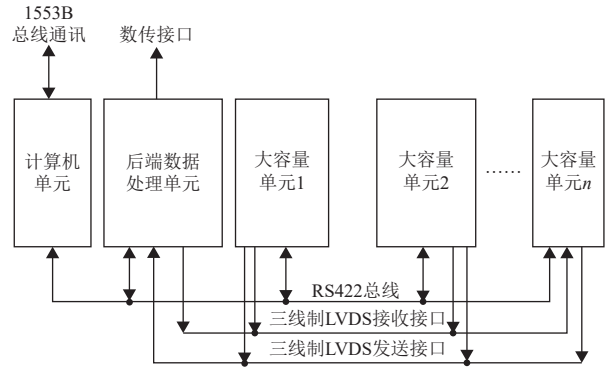


图3 可扩展大容量单元设计

Fig. 3 Design of expandable large-capacity unit

每个大容量存储阵列配备8 Tbits容量的NAND-FLASH存储设备以及一个反熔丝FPGA芯片。FPGA设有一路RS422控制总线, 用于接收控制指令并反馈运行状态; 同时配备一路高速LVDS接口, 专门负责数据的收发, 以此实现大容量数据的高效读写与传输。可扩展大容量单元能根据深空探测任务的实际需求, 灵活规划存储容量, 有效解决了因深空探测对地数传窗口稀缺和下行带宽窄^[16], 导致数据难以顺利下传而引发的数据丢失难题。可扩展大容量存储阵列能够依据指令灵活调控, 支持任意两个单元热备运行, 数据备份存储, 有效规避数据存储单点失效风险, 也能支持冷备运行方案, 只一个大容量存储阵列运行, 数据单份存储, 降低系统功耗的同时, 释放更多物理空间用于扩展存储资源。

3) 高集成通用化设计

对载荷电子学展开深入研究, 将各载荷通用的AD采集、DA采集、信号输出控制(涵盖OC、PWM、电平控制等)等, 整合至前端信号处理单元的高集成处理单元内。针对载荷端的弱信号传输问题^[17], 设计主动激励机制, 强化其抗干扰性能; 针对载荷端大量并行数据传输, 设计并串转换小板, 大幅减少设备间的连接线缆数量。构建具备刷新加载功能的通用化FPGA最小系统^[18], 将以往各载荷独立电子学所配置的FPGA控制功能进行集成设计。在不同飞行阶段, 此系统能灵活加载多模态FPGA程序, 进而执行各类不同载荷的探测控制任务。通过上述一系列举措, 载荷电子学配置得以进一步精简。这使得在有限的重量资源限制条件下, 有更多资源去扩充所携带的载荷类别, 实现

更丰富的探测能力。

4) 智能数据处理

鉴于深空探测存在诸多不确定性,且测控距离遥远、测控弧段稀缺,将零样本学习方法系统引入科学数据处理领域已迫在眉睫^[19]。为此,需研制在轨运行的智能数据处理软硬件平台,搭建零样本分类架构,实现“无样本”类别的跨模态精准匹配与判别^[20]。该架构能够在轨捕捉深空探测任务中所定义的关键事件,生成短小的信息快报,并迅速传输至地面,为后续决策支持提供支撑。

基于分布式高集成载荷管理单元设计方案,载荷拥有多样化集成选择。其一,专用电子学可作为独立单元集成至前端信号处理单元的高集成处理单元内,通用化电子学可选择高集成处理单元,借助多模态FPGA最小系统执行载荷探测控制任务。其二,对集成到前端信号处理单元的电子学,实现集中抗辐照防护与轻量化设计。其三,保留载荷前端探测的简化电子学,把复杂数据处理功能置于后端信息管理单元。这些灵活的集成方式,为不同特性的载荷提供了适配方案,全面提升了载荷系统的适应性与集成度。

经初步测算,集成至前端信号处理单元的载荷电子学与载荷探测前端之间的距离可优化至2 m以内,采用分布式高集成载荷管理架构设计,总重量可降低约29.89%,进一步优化了系统的整体性能。集成设计减重数据统计见表1。

表1 集成设计减重数据统计

载荷	集成设计前重量/kg	集成后设计重量/kg	优化重量/kg
粒子类载荷	8	4	-4
磁场类载荷	12	9.1	-2.9
相机类载荷	20	15	-5
线缆减重	2.15	1.35	-0.8
合计	42.15	29.45	-12.7

4 结论

分布式高集成载荷管理单元凭借创新的架构与关键技术,它不仅有效解决了传统载荷管理方式在信号传输、资源利用、抗辐射等方面的难题,还通过灵活的集成选择,极大提升了载荷系统的适应性与集成度。在未来的深空探测任务中,有望充分发挥优势,助力“天问”系列对火星、木星的深入探测,“嫦娥”后续工程对月球的持续探索,以及太阳系边际探测等项目。通过高效处理科学数据、精准捕捉关键事件,为人类揭示更多宇宙奥秘,拓展科学认知边界,推动中国在深空探测领域持续迈向世界前列,引领人类对浩

瀚宇宙的探索进入全新阶段。

参考文献

- [1] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报(中英文),2014,1(1):5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1):5-17.
- [2] 张荣桥,耿言,孙泽州,等. 天问一号任务的技术创新[J]. 航空学报,2022,43(3):1-7.
ZHANG R Q, GENG Y, SUN Z Z, et al. Technical innovations of the Tianwen-1 mission[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3):1-7.
- [3] 王润福,李存惠. 行星空间环境探测与研究的现状和展望[J]. 空间科学与试验学报,2024,1(3):44-49.
WANG R F, LI C H. A Review on the development of planetary space environment detection and research[J]. Journal of Space Science and Experiment, 2024, 1(3):44-49.
- [4] 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.
ZHANG A B, LI H, KONG L G, et al. Scientific payloads proposal for Chinese Solar system boundary exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6):545-553.
- [5] 王连国,朱岩,周昌义,等. 面向深空探测应用的集成一体化载荷数管技术[J]. 空间科学学报,2018,38(6):960-970.
WANG L G, ZHU Y, ZHOU C Y, et al. Integrated payload OBDH technology for deep space exploration[J]. Space Science, 2018, 38(6):960-970.
- [6] 曹光伟,孙越强,田峥,等. 一种微纳卫星集成化载荷数据处理单元设计[J]. 测控技术,2017,36(5):1-4.
CAO G W, SUN Y Q, TIAN Z, et al. Design of integrated payload data processing unit for Micro/Nano satellites[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(5):1-4.
- [7] 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.
XU K, LI S Z, LI C Y, et al. Demand analysis on autonomous technology for probes to the boundary of the solar system[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(5):647-660.
- [8] 王建昭,张庆祥,郑玉展,等. 木星辐射环境不确定性对总剂量风险的影响[J]. 宇航学报,2019,40(1):118-126.
WANG J Z, ZHANG Q X, ZHENG Y Z, et al. Influence of variable radiation environment on the TID Evaluation in Jupiter orbiting mission[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(1):118-126.
- [9] 陈斌,沈卫华,朱岩,等. 嫦娥二号卫星大容量存储器设计[J]. 航天器工程,2011,20(5):99-104.
CHEN B, SHEN W H, ZHU Y, et al. Design of solid state recorder for Chang'e-2 orbiter[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(5):99-104.
- [10] 胡经纬,王久和,曲秋蔚. 数字电源浪涌抑制方法研究[J]. 电气工程学报,2024,19(1):226-234.
HU J W, WANG J H, QU Q S. Research on surge suppression method of digital power[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1):226-234.
- [11] 梁耀明,马苗,王连国,等. 星载有效载荷自主探测管理方案设计与实现[J]. 空间科学学报,2016,36(2):209-214.

- LIANG Y M, MA M, WANG L G, et al. Designing and implementing of the payload self-exploration[J]. *Space Science*, 2016, 36(2): 209-214.
- [12] 姜亮, 高瑜雄, 周子涵, 等. 一种基于高性能对象存储框架的文件存储服务 and 视频点播服务[J]. *机电产品开发与创新*, 2023, 36(5): 145-147.
- JIANG L, GAO Y X, ZHOU Z H, et al. A File storage service and video-on-demand service based on high-performance object storage framework[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2023, 36(5): 145-147.
- [13] 薛亮, 陈李, 曾舒婷. FPGA和ARM光纤接口的高速大容量存储阵列[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2020, 5(10): 22-25.
- XUE L, CHEN L, ZENG S T. High-speed large capacity storage system of optical fiber interface based on ARM and FPGA[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2020, 5(10): 22-25.
- [14] 丁瑞敏, 田军委, 刘雪松, 等. 轻量化卷积神经网络目标检测算法研究[J]. *西安工业大学学报*, 2022, 42(2): 188-194.
- DING R M, TIAN J W, LIU X S, et al. Research on target detection algorithm of lightweight convolution neural network[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2022, 42(2): 188-194.
- [15] 张博威, 王栋, 何云丰, 等. 天问一号高分辨率相机反熔丝FPGA软件系统设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(2): 170-177.
- ZHANG B W, WANG D, HE Y W, et al. Design of Tianwen-1 high-resolution camera anti-fuse FPGA software system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(2): 170-177.
- [16] 李炯卉, 韩宇, 吴学英, 等. 我国深空探测器测控通信技术发展[J]. *航天器工程*, 2024, 33(6): 116-122.
- LI J H, HAN Y, WU X Y, et al. Development of TT&C and communication technology for China's deep space probes[J]. *Spacecraft Engineering*, 2024, 33(6): 116-122.
- [17] 杨宁, 惠晓强. 微弱信号高精度数据采集技术研究[J]. *现代电子技术*, 2013, 36(9): 71-73.
- YANG N, HUI X Q. Technical research on high-accuracy data acquisition of weak signals[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, 36(9): 71-73.
- [18] 冯汝鹏, 徐伟, 朴永杰. 基于SRAM型FPGA的容错性设计[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(10): 76-80.
- FENG R P, XU W, PIAO Y J. Fault-tolerance techniques for SRAM-based FPGAs[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(10): 76-80.
- [19] 刘真, 徐景胜, 颜菁, 等. 面向零样本图像分类的交互式类属性构建方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2025, 37(2): 243-253.
- LIU Z, XU J S, YAN J, et al. Interactive class attribute construction method for zero-shot image classification[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2025, 37(2): 243-253.
- [20] 王苑铮, 孙文祥, 范意兴, 等. 基于对比学习的跨模态实体链接模型[J]. *计算机研究与发展*, 2025, 62(3): 662-671.
- WANG Y Z, SUN W X, FAN Y X, et al. A cross-modal entity linking model based on contrastive learning[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2025, 62(3): 662-671.

作者简介:

谭羽茵(1986-), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 星上智能处理载荷设计与研制。

通信地址: 北京中关村南二条1号(100190)

电话: (010)68768614

E-mail: tanyuyin@nssc.ac.cn

A Distributed and Highly Integrated Payload Management Technology for Deep Space Exploration Missions

TAN Yuyin, XUE Changbin, XU Haitao, ZHAO Xunfeng, SUN Yang

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Due to the long detection distance and complex space environment, deep-space exploration vehicles are severely constrained in terms of weight, volume, energy, and data transmission. Moreover, the traditional tightly coupled payload electronics integration method fails to meet the requirements of deep-space exploration. Against this backdrop, there is an urgent need for lightweight, miniaturized and highly integrated payload management units to achieve autonomous exploration management and robust radiation resistance protection. In this paper, a design scheme for a distributed and highly integrated payload management unit was proposed, which adopts a two-level architecture: the front-end payload signal processing unit is placed in close proximity to the payload detection front-end, enabling the acquisition and conversion of payload signals; the back-end payload information management unit, not restricted by installation location, undertakes the responsibilities of complex control and large-capacity storage. Its key innovative technologies, including distributed design, scalability, high integration, generalization, and intelligent data processing, provide a multi-dimensional integration solution for payloads. These technologies significantly enhance the adaptability and integration level of the payload system while making up for the shortcomings of traditional methods. When applied to future deep-space exploration missions, this unit can help humans deepen their understanding of the universe and provide key technical support for China's deep space exploration.

Keywords: deep space exploration; distributed; highly integrated; payload management

Highlights:

- The distributed two-level management design shortens signal transmission path, reduces signal loss, and improves signal quality.
- The front-end signal processing unit efficiently completes the conversion of payload signals into data, reducing the number of cables used and lightening the weight burden.
- A centralized total ionizing dose protection design has been carried out to ensure the stable operation of the system in a radiation environment.
- The expandable large-capacity unit can flexibly plan storage capacity, effectively solving the problems of scarcity of Earth data transmission windows and the narrow downlink bandwidth in deep space exploration.
- Develop an intelligent data processing software and hardware platform for on-orbit operation, build a zero-shot classification architecture, and achieve accurate cross-modal matching and discrimination of “no-image-sample” categories.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]