低轨卫星多星协同及星地协同遥通算一体化技术

蒋忠元[1]，王 森[1]，王启舟[2]，曹相湧[2]，侯兴松[2]，雷 磊[2]，孙冬伟[2]，李兴华[1]，马建峰[1]
（1. 西安电子科技大学网络与信息安全学院，陕西 西安 710071；
2. 西安交通大学电信学部，陕西 西安 710049）

摘 要：首先，系统分析卫星遥感、通信及计算系统现状，深入剖析传统卫星遥感系统和卫星遥感通信融合系统架构存在的实时遥感困境；其次，提出一种多星协同、星地协同的卫星遥通算一体化体系架构，详细定义架构的关键组成和工作原理与模式；再次，系统论证一体化架构的先进性及关键技术的可行性；最后，阐述基于该体系架构的仿真分析方法，与传统模式相比，该体系架构可完成分钟级遥感任务，时效性强，潜在应用价值高。

关键词：遥通算一体化；多星协同；星地协同
中图分类号：TP393
文献标识码：A
doi: 10.11959/j.issn.2096−8930.2024007

LEO Multi-Satellite Coordination and Satellite-Ground Coordination Remote Sensing Communication and Computation Integration Technology

JIANG Zhongyuan[1], WANG Sen[1], WANG Qizhou[2], CAO Xiangyong[2], HOU Xingsong[2],
LEI Lei[2], SUN Dongwei[2], LI Xinghua[1], MA Jianfeng[1]
1. School of Cyber Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China
2. School of Electronic and Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Firstly, the current situation of satellite remote sensing, communication, and computing systems was systematically analyzed, and the real-time remote sensing dilemma existing in the traditional satellite remote sensing systems and the satellite remote sensing communication integrated system architecture was deeply analyzed. Secondly, a multi-satellite and satellite-ground coordination integrated system architecture for satellite remote sensing, communication, and computation was put forward, and the key components and the working theories modes of the architecture were introduced in detail. Thirdly, the advantages of this architecture were demonstrated and the feasibility of key technologies was systematically clarified. Finally, the simulation and analysis method based on this architecture, which could reach minute-level remote sensing tasks with high timeliness and high potential application value compared with the traditional mode, was elaborated.

Keywords: remote sensing, communication, and computation integration, multi-satellite coordination, satellite-ground coordination

0 引言

随着空间技术的飞速发展及广泛应用，布局低轨遥感卫星系统已成为我国从航天大国迈向航天强国的必经之路[1-2]。低轨遥感卫星系统搭载高分辨率相机等多种遥感业务载荷，接收并分析地球目标发射的电磁波信号，凭借全球全天候观测能力，精确监测地面目标的物理特性及变化规律。作为获取近地空间信息的重要手段，低轨遥感卫星系统不仅是遥感技术与产业发展的趋势所在，也是多个国家的战略规划焦点。自 20 世纪 70 年代美国

收稿日期：2023−10−18；**修回日期：**2024−01−30
通信作者：蒋忠元，zyjiang@xidian.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.61502375, No.62076191）；陕西省重点研发计划资助项目（No.2023-YBGY-270）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61502375, No.62076191), Key Research and Development Program of Shaanxi (No.2023-YBGY-270)

发射首颗商业遥感卫星以来，各国纷纷制定相关政策和计划，凸显了低轨遥感卫星系统的重要性。我国高度重视该系统的技术和产业发展，国家减灾委员会已印发《“十四五”国家综合防灾减灾规划》等文件，明确提出构建应急卫星星座系统，发展高光谱遥感等先进技术以加强其综合应用。

近年来，随着遥感卫星传感器技术的持续提升及图像分辨率的提高，高分遥感业务需求迅猛增长，遥感数据量呈指数级增长[3]，尤其在抢险救灾等应急情境中，遥感卫星系统亟须在数分钟内实现实时数据的采集与快速响应，以应对实时遥感需求。因此，遥感卫星系统不仅须拥有高精度的数据感知能力，还要构建高效海量应急遥感数据传输与处理基础设施，以保障数据能在最短时间内被采集、传输并处理，进而实现遥感数据的“即感即传”遥感愿景。

传统遥感模式在感知、传输及处理环节存在孤立现象，信关站全球布局受限，以及“先上注，后处理”遥感模式等困境[4]，导致传统遥感业务的处理链路烦琐且效率低下，响应时延无法满足现代遥感需求。相较于美国应急遥感系统仅需 12 min 即可完成响应，我国现有遥感系统对境外应急遥感响应的时间高达 20～30 h[5]，亟须遥感破局。

为克服传统遥感卫星的局限，研究人员正探索遥感与卫星通信的深入融合，依赖全球低轨卫星通信，集成遥感和通信资源，以此构建卫星遥通融合体系[5-6]。具体而言，遥感卫星在此体系中充当感知节点，通过接入卫星通信网络，迅速转发遥感指令和数据，使遥感操作摆脱全球地面站布局限制，实现“随时随地”遥感任务执行，有效地提高了响应效率。

尽管卫星遥通融合体系有效地促进了遥感系统的发展，但其冗长的“后处理”方式[7]未能充分应对海量遥感数据产生的压力，尤其是考虑到海量遥感数据冲击对星载设备性能、星间以及星地链路带宽所构成的挑战。为此，亟须进一步实现多星及星地间遥感、通信和计算系统资源的高度整合、互馈增强，以实现多星协同、星地协同遥通算一体化系统。该系统将充分利用多星协同及星地协同的遥感、通信和计算资源，获取更全面的先验情报，并拓展遥感作业范围，以适应超低时延、极高可靠性、高速传输、广泛目标覆盖以及精准定位等方面的遥感需求，最终实现“分钟级”实时遥感。此外，根据《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015－2025 年）》的相关指导，我国正积极推动实现一星多功能、多星网络化、网络间协同作业以及数据整合处理的空间基础设施建设。

1　国内外卫星遥感、通信及计算系统发展现状

1.1　国内外卫星遥感系统发展现状

全球卫星遥感系统的发展[8]日新月异，其种类及应用范围不断扩大。例如，美国的 Landsat、法国的 SPOT 以及我国的高分系列等，代表国际遥感卫星技术的先进水平，具备海量高分遥感数据获取能力。具体数据见表 1。

1.2　国内外卫星通信系统发展现状

低轨巨型通信星座[9]已成为卫星通信系统发展的主流，如国外的 Starlink、OneWeb 等系统，以及国内的鸿雁、银河 Galaxy、GW 星座等项目。此类低轨巨型通信卫星星座旨在利用数百至数千颗小型通信卫星，为全球提供高速互联网接入服务。相关数据见表 2。

1.3　国内外卫星计算系统发展现状

随着卫星计算技术[10]的不断进步，卫星计算模式正在发生转变。传统的后地面网络计算模式正在向单星在轨计算模式转变，最终将向智能化边缘多星在轨计算模式发展，该转变将进一步提高遥感数据的实时获取和处理能力。后地面网络计算、单星在轨计算和边缘多星在轨计算 3 种模式的特性对比见表 3。

表 1　国内外代表性在轨遥感卫星相关数据

卫星名称	卫星载荷类型	分辨率/m	所属国家
WorldView-4	光学	0.31（全色）、1.24（多光谱）	美国
Capella-3	合成孔径雷达	0.5	美国
SPOT-7	光学	1.5（光学）、6（多光谱）	法国
ALOS-2	合成孔径雷达	1（全色）、3（多光谱）	日本
高分多模卫星	高分辨率相机、大气同步校正仪	0.5（全色）、2（多光谱）	中国
吉林一号高分 03 星	光学	亚米级（全色）、小于 4（多光谱）	中国

表 2　国内外代表性低轨巨型通信星座计划相关数据

星座名称	轨道高度/km	卫星数量/颗	所属国家
Starlink-Gen2	340	5 280	美国
OneWeb	1 200	648	美国
Kuiper Shell-1/2/3	630/610/590	1 156/1 296/784	美国
三星	1 400	4 600	韩国
KLEO	600	624	德国
鸿雁星座	1 100	300	中国
银河 Galaxy	500	2 800	中国
GW-A59	590、600、508	480、2 000、3 600	中国
GW-2	1 145、1 145、1 145、1 145	1 728、1 728、1 728、1 728	中国

表 3　计算系统计算特性对比

计算方式	数据端的距离	计算能力	实时性	是否节省带宽	多星分布式计算能力	星地协同分级计算能力	计算卫星星座规模	遥感时效性需求
后地面网络计算	远	强	低	否	不具备	不具备	无	仅适用于常态化遥感业务
单星在轨计算	近	较弱	低	是	不具备	不具备	单星计算（扩展性差）	仅适用于常态化遥感业务
边缘多星在轨计算	近	较强	高	是	具备	具备	多星可扩展分布式计算（巨型星座）	适用于应急及常态化遥感业务

2　低轨卫星遥通算一体化网络架构

2.1　传统遥感卫星体系架构

如图 1 所示，传统遥感卫星体系架构主要由遥感卫星平台、星地链路以及地面网络系统 3 部分构成。首先，遥感卫星平台执行近地观测任务，并通过星地链路传输数据。低轨遥感卫星具有高重访频率、短周期、低发射及维护成本、小数据传输时延等优势，此类卫星通常装备有光学和雷达传感器载荷，其分辨率直接影响成像质量和覆盖范围。例如，我国高分多模遥感卫星能达到 0.5 m 的全色空间分辨率，展现出高质量的遥感数据成像能力。其次，星地链路包括遥测控制的上行链路和遥感数据的下行数据传输链路。目前，我国在部分地面站配备了 4×1.5 Gbit/s 的 Ka 频段高速数据传输链路[11]，实现了遥感数据的快速回传。由于频段资源稀缺，此技术尚未得到广泛应用。最后，地面网络系统由信关站、测控系统、运控系统和数据计算中心组成。信关站负责卫星通信，接收和发送遥感数据及测控指令，同时承担卫星导航和在轨测试任务。随着业务需求

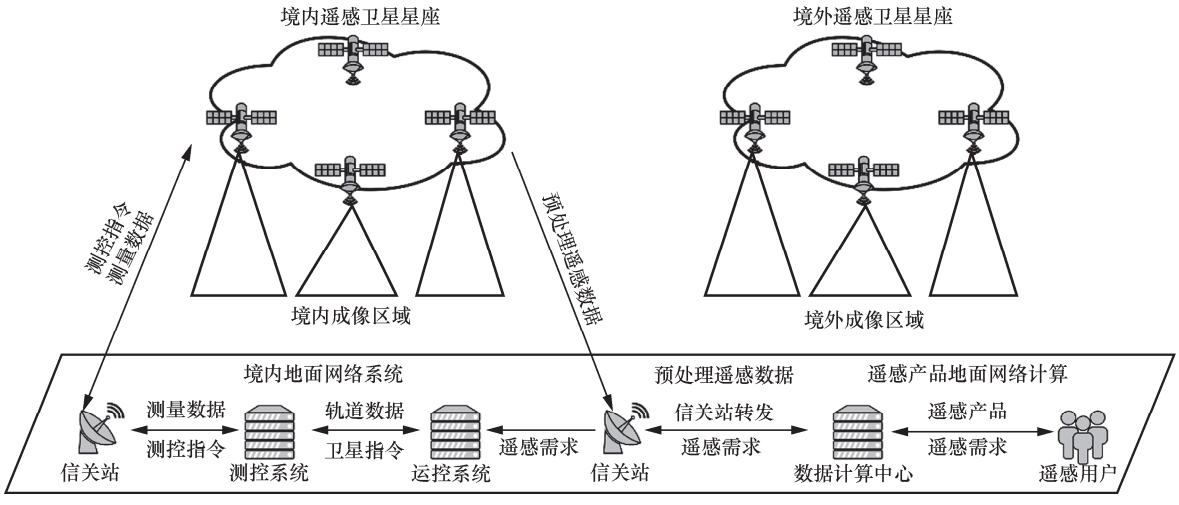


图 1　传统遥感卫星体系架构

的增长，全球各国正在加速遥感卫星地面站的建设，以提升服务的可靠性。我国目前已初步建成了一个覆盖全国的测控通信和数据中继地面站网络。测控系统[12]主要负责卫星的定轨遥控和测控指令的管理，运控系统统筹规划卫星与地面资源，接收遥感任务需求。数据计算中心对原始遥感数据进行处理，生成符合用户需求的定制化遥感产品。

遥感任务通常涉及多个协同作业平台，其完整的作业流程包括：地面信关站依据测控指令向遥感卫星系统发布作业指令；遥感卫星系统负责遥感数据的采集工作；该系统随后对星载数据进行初步处理，生成预处理遥感数据；此类预处理遥感数据经星地链路传输至地面信关站；地面信关站进一步将上述预处理遥感数据转送至数据计算中心；数据计算中心处理生成最终遥感产品，并转发给遥感用户。

随着遥感技术需求的迅速增长和空间技术的持续进步，特别是小型低轨遥感卫星的投入使用以及图像分辨率与观测范围的持续提升，遥感数据量急剧增加，呈现出爆炸式增长的特点，遥感任务时效性受到巨大挑战。

图 2 展示了传统遥感卫星系统遵循的“先上注，后处理”遥感任务处理流程。该流程从任务规划到遥感产品生成可能耗时数天至数周[13]。首先，地面控制中心需提前 4 至 5 天上传任务计划至卫星，以保障任务顺利进行。其次，遥感卫星经过目标区域时，利用光学和合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）等载荷采集原始数据，单次数据量可达太字节级。然而，受限于卫星的计算和存储资源，往往仅能压缩数据至吉字节级的预处理遥感数据。此类预处理遥感数据通常经过带宽受限的 X 频段星地链路回传至地面信关站，并由信关站转发至数据计算中心进一步处理，最终生成遥感产品以供用户使用。

综上所述，尽管现有的卫星遥感技术已经达到了厘米级的空间分辨率[14]，具备了广泛的高质量观测能力，然而其时间分辨率仍以天或周为单位，难以满足实时遥感的需求。随着各类应急遥感业务逐渐常态化，卫星遥感系统在响应时间方面的不足日益凸显。

2.2　遥通融合卫星体系架构

如图 3 所示，为了克服传统遥感卫星系统在时效性方面的不足，国内外研究机构提出了遥通融合卫星体系架构。该体系架构的核心思想在于将遥感卫星网络作为遥感数据感知节点，无缝接入全天候、全球无死角覆盖的通信卫星网络。通信卫星网络则作为遥感卫星网络的高速中继“信息干线”，实现多源遥感数据的快速集成与分发，从而突破传统遥感卫星系统重访时间长和区域覆盖范围有限的限制。同时，星间链路可以进一步加速遥感数据的传输和处理流程，缩短遥感响应周期。相较于传统遥感卫星系统，遥通融合卫星系统既不需要增加系统重复建设和维护成本，又能提高信息化应用的效率，增强遥感时效性。

尽管遥通融合卫星系统在提高时效性方面已取得一定进展，但处理遥感数据时，仍然依赖于“后处理”模式，增加了处理环节和时间，如图 4 所示。此外，系统未能充分考虑到在处理海量遥感数据时，受限于星载计算能力、星间以及星地通信链路带宽的挑战，仍难以实现“即感即传”的遥感愿景。

2.3　当前遥感系统协同困境

如图 5 所示，现有的卫星遥感系统在实时遥感的实施上遭遇关键性的挑战，主要表现在未能充分发挥遥感（感知）、通信和计算资源的多星与星地协同优势，存在如下所述的协同困境。

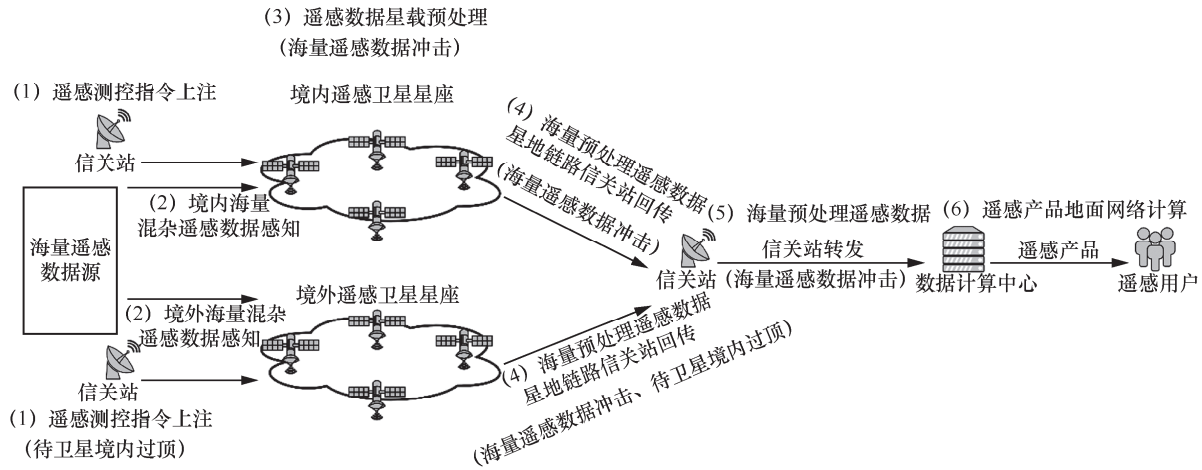


图 2　传统遥感卫星系统遵循的“先上注，后处理”遥感任务处理流程

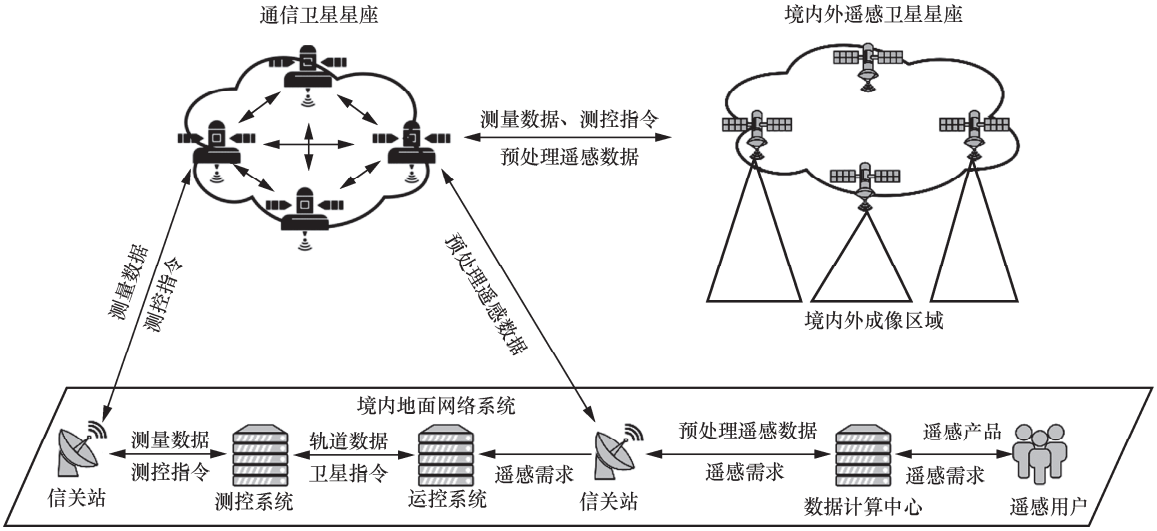


图 3　遥通融合卫星体系架构

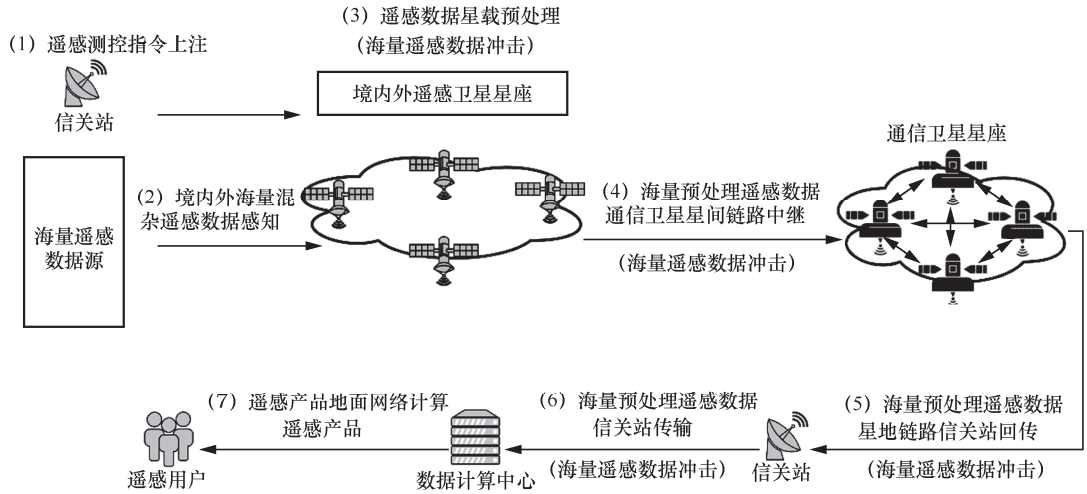


图 4　遥通融合卫星体系架构“后处理”遥感任务处理流程

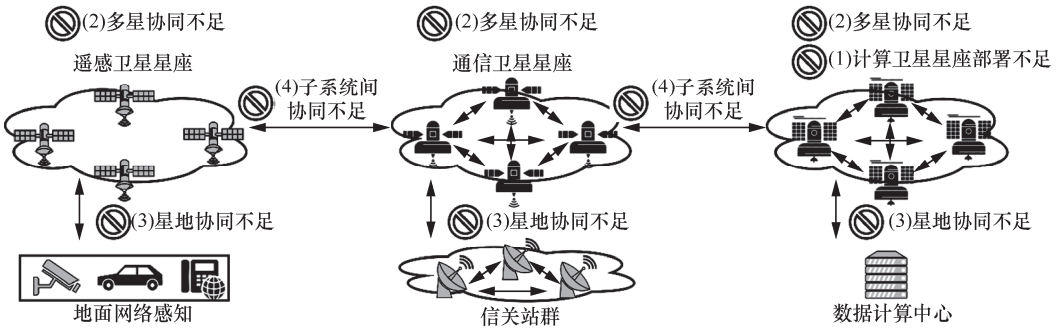


图 5　当前遥感系统协同困境

第一，计算卫星星座部署不足[15]，严重依赖于地面网络进行后期数据处理。这不仅增加了星间与星地链路的带宽负担，也导致处理链路复杂、响应时延显著增加。因此，提升卫星星座的计算部署能力显得尤为重要。尽管太空环境和载荷限制了卫星的处理能力，但边缘计算的引入预示着这种局面的改变。通过将计算资源前置至网络边缘，减少了系统对中心带宽的依赖，并简化了处理链路，从而显著提高了遥感数据的响应效率，是实现实时、高效空间信

息网络的关键技术之一。边缘计算卫星在处理和应用海量空间信息方面展现出较大潜力，预示着在遥感领域的广阔应用前景。

第二，当前卫星星座在实现多星协同[16]方面仍存在一定的短板，限制了遥感任务分工优化潜力。目前，卫星遥感系统尚未充分挖掘和利用星间链路实现多星协同的潜力。特别是在传统的遥感卫星系统中，通信载荷技术的应用限制，使多星协同不具备前置通信条件。随着航天工业技术的发展，现有的卫星星座已经具备集成通信模块的能力，能够实现高速星间链路互联。在此基础上，星座中的卫星群可以围绕共同的任务目标进行有效协作，传统单星独立作业模式向多星协同作业模式的转变，将为遥感系统整体处理性能带来质的提升。

第三，星地协同不足[17]导致星地资源未得到最大化利用。目前，卫星遥感系统与地面资源间协同上的断层，造成了资源独立运作而未能实现高效协同，进而导致遥感、通信及计算资源利用的不均衡，从而减缩了任务处理的综合效能。随着通信技术的持续发展，构建星地高速传输链路已成为现实。通过星地高速传输链路，能够建立多维度的数据处理体系，实现星地遥感、通信和计算资源的实时协同最大化利用，实现资源的均衡配置与优化输出，进一步提高遥感时效性。

第四，当前遥感、通信和计算三大子系统间的协同作用不足[18]，导致它们之间的相互依赖和增效机制未能得到充分发挥。例如，遥感所要求的数据量和快速响应能力制约了通信子系统的带宽和传输速率；通信链路的质量则直接关系到遥感数据的观测覆盖面和处理速度；同时，计算子系统的处理能力也必须与遥感和通信的需求相匹配。针对上述子系统间的困境，亟须在宏观层面设计一套综合性的遥感、通信和计算卫星子系统立体协同体系架构，实现三者的相互制约、相互反馈和相互促进，提升遥感数据获取与应用的整体效能。

综合前述分析，当前遥感系统的任务处理链条冗余、资源分配孤立、缺乏模块间协同利用资源的设计思路，导致端到端遥感任务效率低下。为此，需在系统架构层面，构建多星协同、星地协同的遥通算一体化体系架构，最大化利用整个遥通算子系统资源，实现实时遥感战略需求。

2.4　多星协同、星地协同遥通算一体化体系架构

鉴于现有遥感卫星体系遥感响应缓慢的困境，本文构建了多星协同、星地协同遥通算一体化体系架构，如图 6 所示。所提出的架构在纵向上划分为遥通算子系统、多星协同以及星地协同；在横向上实现了遥通算子系统联动协同，互馈增强，最终实现“即感即传”遥感愿景。

（1）多星协同与星地协同遥感

（a）多星协同遥感。多星协同遥感技术极大地增强了特定区域内目标的检测与监测精度。随着卫星制造技术突

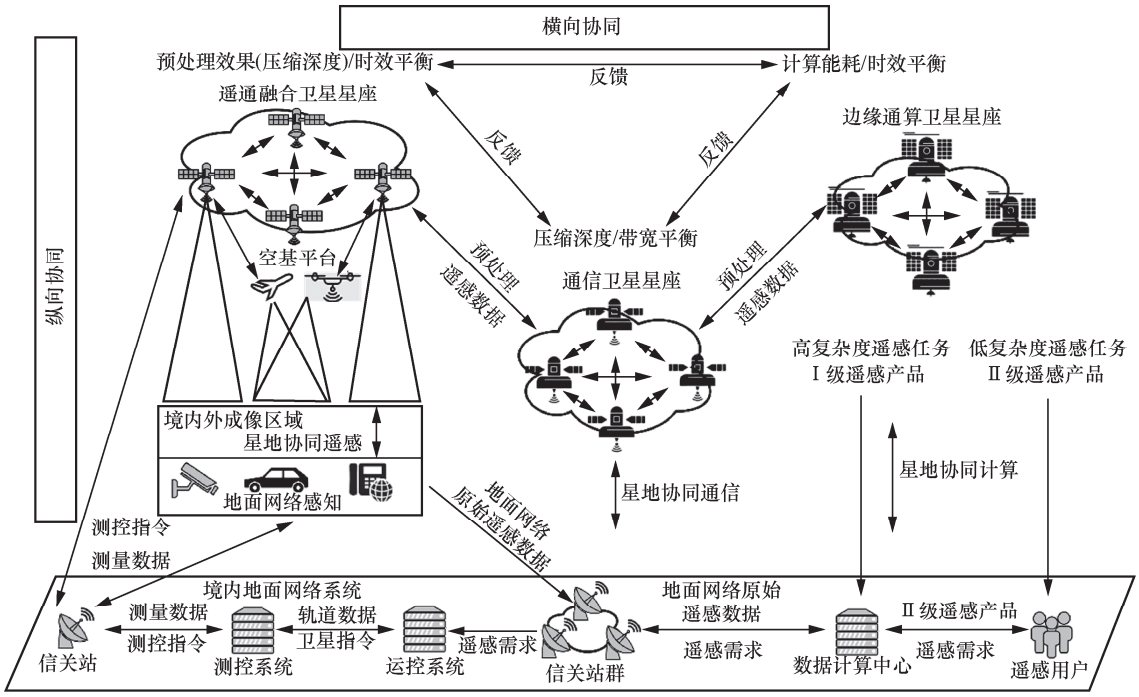


图 6　多星协同、星地协同遥通算一体化体系架构

破，遥感卫星星座已能整合通信载荷，进而演化为遥通融合卫星星座。在此星座架构下，各卫星可依据轨道位置，配备光学载荷、SAR 等多样化遥感设备，执行对地表多目标的立体式多角度监测。相较于传统单星遥感系统，可获取更全面的多源数据，提升遥感感兴趣区域关键信息的探测及提取精确度。例如，多角度遥感数据有助于三维重建，从而增强目标识别准确性。

（b）星地协同遥感。随着地面传感平台技术的发展，地基站点可实施与卫星的联合遥感作业。地面传感网络能整合高性能传感器，如高清晰度摄影机、测高雷达等，实现实时遥感数据获报，有效弥补卫星广域监测的局限。对比使用单独的卫星星座或地面网络，星地协同遥感方式能实施广域全覆盖遥感数据感知，其中卫星星座负责提供广阔的覆盖范围及稳定的监测能力，而地面网络则增强了局部细节的捕捉及快速反应。

总的来说，多星协同与星地协同遥感方案可有效提高地表目标的精准探测与变化监测效能，特别适用于对重要基础设施、自然灾害等关键区域的实时精确遥感需求。

（2）多星协同、星地协同通信

（a）多星协同通信。近年来，随着巨型通信卫星星座技术的快速发展，已可构建具有全球无死角覆盖的低时延及高容量的卫星通信星座网络。通过部署数千颗密集的通信卫星，部署动态多星多径网络切片，实现遥感业务流的动态调度与流量控制，以满足服务质量（Quality of Service，QoS）多样化的遥感任务需求。尤其是面对应急遥感任务，系统能够优先分配必要的星间通信资源，确保遥感信息的实时获取与处理。相较于单星系统，此星座架构提高了带宽和通信可靠性，提升了应急遥感任务时效性。

（b）星地协同通信。与此同时，利用地面站独特的广覆盖优势，有效支持常态化遥感数据传输，有助于减轻卫星系统的负载。具体来说，地面网络可以为非应急常态数据流设置较低的传输优先级，容许一定的时延，同时利用其高并发传输的经济性。

综上所述，卫星与地面网络双层协同后，可根据数据的重要性智能调度业务流量，在确保关键应急响应实时性的同时，也提升了资源利用的效率，为 QoS 多样化的遥感任务提供了高可靠、低时延的端到端通信传输解决方案。

（3）多星协同、星地协同计算

（a）多星协同计算。卫星星座内嵌边缘计算单元，赋予其在轨实时处理能力，构成边缘通算卫星星座。该星座可实现协同作业，完成遥感数据目标识别、变化检测等遥感任务。相较于单星作业，多星分布式协同作业优势明显，能够最大化利用有限的卫星算力以及太阳能储能资源，实现高效遥感任务处理。例如，面向计算复杂度低的遥感任务，边缘通算卫星星座利用多星分布式协同处理，可高效快速生成遥感情报产品，并直接转发给遥感用户，大幅提高遥感处理时效性。

（b）星地协同计算。针对高计算复杂度遥感任务，边缘通算卫星星座与数据计算中心进行星地分级协同，星座负责初级数据处理，如数据标注、特征提取等，随后将初步成果传送至数据计算中心，以进一步执行模型迭代、深度分析，完成最终遥感产品并分发给用户。

综合考虑，多星协同计算及星地协同计算优化了任务复杂度与计算资源的适配性，提高了遥感产品的数据处理时效性。

（4）遥通算深度横向协同

在遥通信算一体化系统中，卫星遥感、通信、计算三大子系统之间，存在着深度的相互制约与协同作用。首先，遥感任务对数据处理的效率及时效性要求，决定了通信子系统的数据压缩率与带宽参数；通信子系统提供的带宽资源，也直接影响了遥感数据采集后的处理速度。其次，通信子系统的带宽供应能力与遥感任务的时效性要求，共同作用于计算平台的处理负荷及能源消耗策略的制定；计算子系统的性能与效能，亦对通信子系统的数据压缩率和遥感子系统的实时响应能力产生制约。此外，计算子系统的能源配置与热控策略，将对遥感子系统的连续作业和任务规划产生重要影响。因此，上述三大子系统的相互作用及深度协同能最大化提升整体系统资源效能，完成“实时感知-传输-处理”遥通算一体化的遥感目标。

多星协同、星地协同遥通算一体化体系架构通过实现上述 4 个关键深度协同优化流程，确保了端到端遥感信息处理的高效性。如图 7 所示，在遥感数据获取环节，各卫星星座根据各自的轨道位置配置适当的载荷，协同获取并共享多源立体观测数据，提升了对地面目标信息的检测与提取精度。同时，地面传感网络精确捕捉目标区域的局部细节，实现与卫星观测数据的无缝立体协作。在数据传输环节，卫星星座构建的高密度低时延通信网络对应急遥感数据提供优先级高的实时传输；地面站负责常态化遥感数据的广域收集，实现与卫星网络的资源协同。针对遥感数据计算环节，星座内的边缘计算功能支持分布式多星星载处理和星地分级处理，实现任务复杂度与计算资源适配，以增强遥感产品的处理时效性。遥通算三大子系统的紧密协同与相互制约，构建了高效的端到端处理链，大幅缩短了遥感产品生成周期。

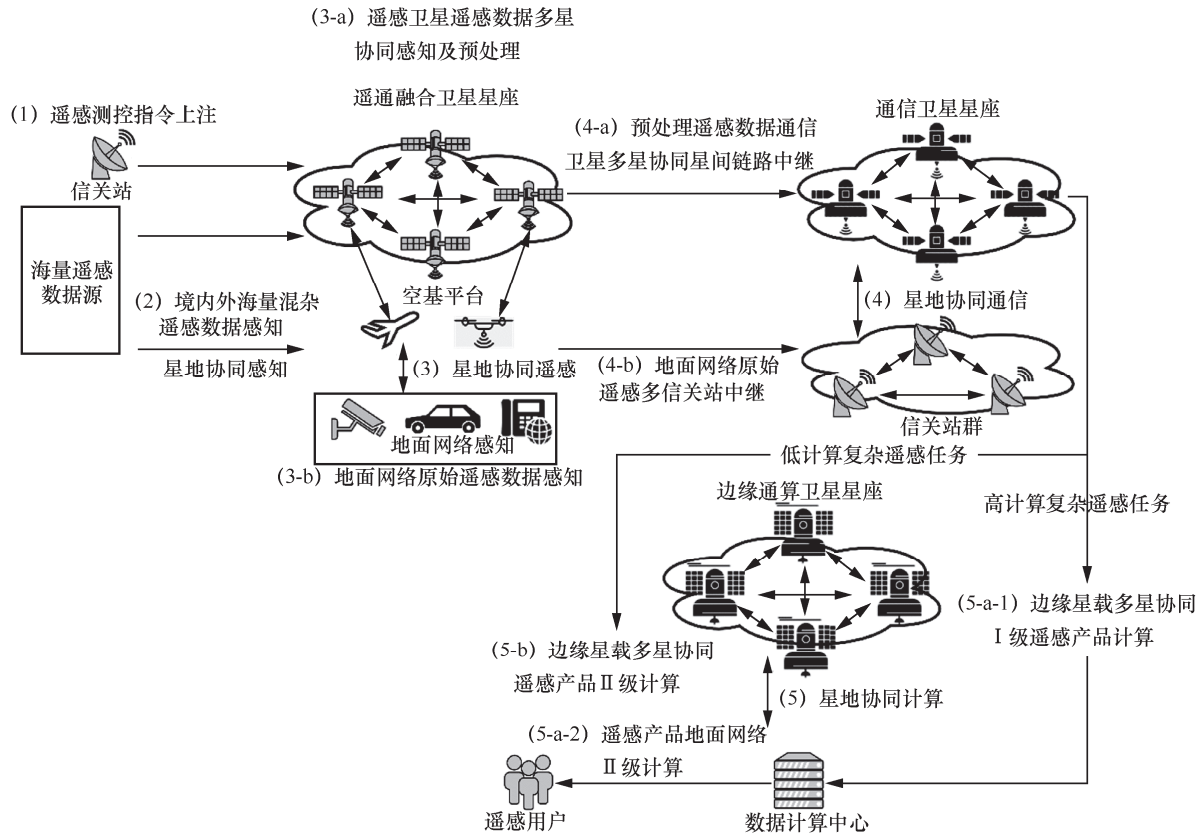


图 7　遥通算一体化体系架构“多星协同、星地协同”遥感任务处理流程

2.5　“即感即传”卫星系统架构特性比较

在推进“即感即传”理念的卫星系统架构研究中，美国太空探索技术公司（SpaceX）提出的星盾（Starshield）[19]计划及遥通算融合星座系统，为当前两种主流的系统架构方案。其中，星盾计划继承并扩展了 Starlink 项目的基础，旨在构建一个全球覆盖、多功能集成的遥感和加密通信模块化服务平台。遥通算融合星座呈现了其在单一卫星平台上集成通信、感知和计算功能的能力，实现任务载荷的高效并行处理。两者的核心追求皆是增进遥感数据的实时处理及传输效能。

（1）工程可行性对比

星盾计划、遥通算融合星座以及多星协同、星地协同遥通算一体化体系，在工程可行性方面的差异见表 4。星盾计划在安全通信与精确地球观测领域，展示了其良好的性能。然而，系统架构的定制需求，限制了其遥感应用的广泛性及扩展性。此外，该计划主要强调数据传输的安全，可能会制约系统在广泛的遥感和数据处理任务中的灵活性及可伸缩性。遥通算融合星座在单星中集成了通信、感知和计算等多种载荷，但在协调遥通算功能特别是在保证数据处理的高吞吐量和强计算需求之间的平衡时，面临巨大挑战，可能对系统的整体性能和响应速度产生负面影响。此外，受限于当前航天工业发展状况，该架构难以兼容现有卫星星座。相反，本文所提出的体系架构强调多维协作，即通过多星协同及星地协

表 4　星盾计划、遥通算融合星座以及多星协同、星地协同遥通算一体化体系的工程可行性对比

方案	工程技术创新	可扩展性	遥感数据处理效率
星盾计划	基于“星链”的遥通一体化系统	专注国防遥感，广泛遥感应用受限	地面网络后计算，链路冗余
遥通算融合星座	遥通算载荷单星集成	系统扩展性和稳定性风险高	遥通算数据融合处理，复杂性高
多星协同、星地协同遥通算一体化体系	多星、星地遥通算多维一体化协同	现有基础设施兼容性高，确保可靠性和冗余性	遥通算星座、地面网络多维资源协同，遥感时效性高

同，最大化利用并兼容现有系统资源，助力实时遥感。

综合而言，多星协同、星地协同遥通算一体化体系在系统的可扩展性、整体化设计和数据处理效率方面，提供了创新的策略。

（2）经济成本效益对比

表 5 分析了星盾计划、遥通算融合星座以及多星协同、星地协同遥通算一体化体系，在经济成本效益方面的优势及限制。星盾计划高度依赖专用网络，研发及运维成本相对较高。遥通算融合星座致力于在单个卫星平台中融合多种有效载荷，面临的是现有航天工业技术水平的制约，不仅需要高昂的研发支出，而且其与现行卫星星座网络的兼容性受到制约。多星协同、星地协同遥通算一体化体系最大限度地利用现有的天基和地面网络资源，实现成本的有效控制，同时增强了相关技术与现行卫星星座架构的兼容性。

综上所述，尽管星盾计划与遥通算融合星座具备各自的创新性和专有价值，但本文所提体系架构能够最大化利用现有基础结构的整合优势，形成了一个经济高效、扩展性良好的解决方案。

3 关键技术及挑战

3.1 高度拓扑变化下端对端智能弹性通信卫星网络切片部署技术

与资源充沛且结构稳定的地面网络切片相比，卫星网络切片面临着在应急情况下处理海量遥感数据流、常态化遥感数据流以及与互联网数据流竞争的需求，并且还必须适应卫星星座网络频繁变化拓扑的挑战，因此，在核心技术层面上实现突破刻不容缓。具体而言，首先，需开发适应高度动态拓扑变更的弹性通信网络切片拓扑计算方法；其次，需实现具有服务质量差异化的遥感业务动态化，并确保切片部署工作的确定性。解决这两个关键技术问题将促进建立一个既能够满足 QoS 需求差异化，又具有服务确定性和自动化能力的卫星网络切片体系。

（1）高度拓扑变化弹性通信卫星网络切片拓扑计算方法

针对低轨卫星网络拓扑结构持续动态变化的特性，同时考虑到卫星数量显著增加导致的拓扑变化频率增加，网络管理的复杂性及成本也相应升高。现行的管理策略包括虚拟拓扑法及虚拟节点法。虚拟拓扑法是基于星座拓扑周期性的假设，将时间离散化，并认定拓扑只在时间片交界时变化，在时间片内维持不变。虚拟节点法通过划分小区域即虚拟节点，并为每个节点分配逻辑地址，此地址与相应卫星相映射，并实现共享。然而，面对用户规模的增长和低轨卫星过顶时间的短暂性，传统拓扑快照法导致的存储资源消耗问题变得尤为突出。因此，研发针对大型卫星星座网络的高效率动态网络切片拓扑计算方法成为当务之急。通信卫星网络切片拓扑计算方法对比见表 6。

（2）QoS 差异化遥感业务动态确定性切片部署方案

通信卫星网络在满足多样化 QoS 需求方面，尤其针对应急遥感、常态化遥感服务及卫星互联网综合数据流管理方面，面临重大资源配置挑战。例如，应急遥感业务因其高带宽和低时延的 QoS 需求具备通信资源优先权；常态化遥感更着重服务的持续性，以保障长期通信需求的连续性。同时，卫星互联网的数据流亦竞争有限的通信资源。因此，定制化和动态重构的卫星通信网络服务资源方案是克服上述挑战的关键。此技术将不同级别 QoS 的遥感业务需求映射至合适的通信资源和网络功能中，构筑可动态调节的网络切片以适应服务需求变化或卫星网络状态变动，实现应

表 5 星盾计划、遥通算融合星座以及多星协同、星地协同遥通算一体化体系经济成本效益对比

方案	开发维护成本	长期经济可行性	整体经济成本效益
星盾计划	高，遥感专网	有限，长期遥感专网维护支出	适中
遥通算融合星座	高，单星遥通算多载荷集成，受限于现有航天工业技术	有限，高昂的遥通算载荷集成研发成本	低
多星协同、星地协同遥通算一体化体系	低，基于现有的通用天基、地面网络资源	高，较低的构建成本及现有资源的最大化利用	高

表 6 通信卫星网络切片拓扑计算方法对比

方案	核心理念	路由稳定性	路由灵活性	计算复杂度	存储需求
虚拟拓扑法[20]	拓扑时间片	高	差	中等	高
虚拟节点法[21]	动态描点	中等	高	高	低

急及常态化遥感服务间的理想平衡。该映射过程依靠网络功能虚拟化[22]（Network Function Virtualization，NFV）以及软件定义网络[23]（Software Defined Network, SDN），两者是构成卫星网络切片服务可靠性的基础。NFV 技术使网络功能的虚拟化成为可能，并显著提升卫星网络服务的重构速度；SDN 技术提供网络资源的灵活控制，实现资源动态分配并优化数据传输路径，满足遥感任务的即时需求。基于 NFV/SDN 的通信卫星网络切片部署方案对比见表 7。

表 7　基于 NFV/SDN 的通信卫星网络切片部署方案对比

方案	核心理念	灵活性	可伸缩性	效率	安全性
NFV[22]	网络功能虚拟化	中等	高	高	高
SDN[23]	集中式网络控制及可编程	高	中等	中等	高

3.2　星载遥感数据压缩编码方案

在遥感领域，处理及有效传输大量遥感数据成为重要难题[24-28]，特别是在星载遥感数据的收集与传输过程中，面对带宽受限的星间和星地链路，迫切需要高效率的数据压缩技术。考虑到卫星的计算能力和能量供给均有限，加之卫星网络环境的特殊性，数据在传输过程中可能发生丢失，导致信息不完整。因此，研制轻量化、高效的星载遥感数据压缩编码技术，变得尤为迫切。高效的星载遥感数据压缩编码方案应满足两个基本要求：第一，在编码阶段，应显著减少运算需求，以适应资源受限的卫星工作环境；第二，方案需要保证即使在数据丢失率较高的情况下，也能准确重建高质量的遥感图像。当前流行的星载遥感数据压缩编码方案对比见表 8。

3.3　星地协同大模型分割训练技术

在计算卫星网络中部署和执行人工智能大规模模型及算法时，须慎重考量卫星计算/能源资源与运行效率之间的权衡。一方面，若在卫星网络中直接执行庞大的人工智能模型，可能因计算资源有限而导致效率降低；另一方面，模型分割训练技术[29-31]提供了一个关键解决途径，它将模型分解，将复杂的模型训练部分交由地面中心云处理，而模型的其他组成部分在卫星系统中执行，从而提升资源效率并减少响应时延。主流人工智能大模型分割训练技术性能对比见表 9。

3.4　分布式多星协同及星地协同遥感任务卸载技术

在处理大规模且计算复杂度各异的遥感数据时，受限于算力及能源资源的卫星星座往往需要实施任务卸载策略[32-33]，构建分布式遥感数据的层次化处理架构。具体而言，任务卸载策略主要分为两类：第一类，针对计算复杂度较低的遥感任务，可采用多星协同分布式计算；第二类，针对计算复杂度较高的遥感任务，通过星地协同计算将任务部分或全部下放至地面云中心进行处理。然而，任务卸载性能受到网络带宽、可用计算资源、数据处理量及功耗等多种因素的影响。同时，高速移动的低轨卫星可能会引发星间及星地链路通信频繁切换，可能中断计算卸载任务以及导致数据丢失。因此，确保计算卸载的连续性和系统的容错能力至关重要。为此，综合定量分析各遥感任务卸载因素，制定高效遥感计算任务卸载决策具有重要的意义。主流分布式多星协同及星地协同遥感任务卸载技术对比见表 10。

4　遥感时效性对比试验

本对比试验旨在验证多星协同、星地协同遥通算一体

表 8　当前流行的星载遥感数据压缩编码方案对比

方案	核心理念	压缩比	数据完整性	计算复杂性	压缩速度
无损压缩[24]	无损压缩原始数据	中等	高	高	中等
有损压缩[25]	丢失细节，适用于大型数据	高	中等	中等	高
转换编码[26]	将数据转换为不同的域，以实现有效压缩	高	高	高	中等
近乎无损压缩[27]	最小数据丢失可控，高效压缩且数据完整性高	中等	中等	中等	中等
矢量化[28]	将输入数据分类为一组有限的值，以减少数据量	高	高	高	中等

表 9　主流人工智能大模型分割训练技术性能对比

方案	核心理念	可扩展性	计算效率	数据吞吐量	灵活性
模型并行[29]	多个设备上拆分模型的层	高	中等	中等	中等
数据并行[30]	将数据分批次进行并行处理	中等	高	高	低
流水线并行[31]	对模型分段以进行数据流水线处理	高	高	高	中等

表 10　主流分布式多星协同及星地协同遥感任务卸载技术对比

方案	主要应用	效率	时延	带宽使用	能源消耗
基于优先级的卸载[32]	基于数据优先级的卸载	高	高	中等	高
高效节能卸载[33]	基于能源可用性的卸载	中等	低	中等	低

化体系架构相较于传统遥感系统和遥通融合系统在遥感时效性方面的独特优势。首先详细阐述了试验设计的技术路线，包括遥感卫星平台、星间链路、星地链路、地面网络配置及部署策略，遥感数据压缩编码与预处理算法，以及遥感数据的处理方法。最终，在联合模拟仿真平台上，开展了上述三个系统面对海量遥感数据的端到端处理效率及时延等关键指标。

4.1　遥感卫星平台

遥感卫星平台的试验选用了高分一号卫星[34]。高分一号卫星作为我国自主研制的高分辨率对地观测卫星，配备了两台 2 m 分辨率的全色相机及 4 台 8 m 分辨率的多光谱相机。相较于国际同类卫星，高分一号卫星融合了高空间分辨率和高时间分辨率的优势，具备 4 天的短重访周期。此项性能优势源自其高级光学传感器，尤其是在 800 km 宽幅多光谱成像方面，明显超越国际同类卫星。得益于该卫星的高精度观测能力，高分一号卫星能在单次成像过程中覆盖逾百万平方千米，以 2 m 全色和 8 m 多光谱的分辨率捕获地面目标，产生的原始图像数据在数十 TB 量级。

4.2　星间链路部署

本试验部署了采用 Ka 频段的星间链路，并设定了 1 Gbit/s 的带宽。Ka 频段具有带宽资源丰富的优势，1 Gbit/s 的链路容量足以满足小型卫星间大量遥感数据的低时延传输需求。Ka 频段相较于 S 频段，对气象条件的依赖性更低，有助于确保链路稳定性和可靠性。

4.3　星地链路部署

本试验采用 X 频段进行星地链路的部署，配置带宽为 1 Gbit/s。X 频段以其充足的带宽资源为特征，1 Gbit/s 的链路容量确保单颗遥感卫星与地面站之间海量原始数据能够高效回传。相较于 Ka 频段，X 频段更适合执行长距离的卫星通信任务。我国已建成若干个 X 频段高速卫星地面站，成为实现高容量遥感数据回传的优选方案。

4.4　地面网络传输链路部署

试验中，地面数据传输链路的带宽定为 0.5 Gbit/s。根据卫星地面信关站的实际链路部署，密云站至总部之间的链路带宽可达 10 Gbit/s，喀什站至三亚站的带宽达到 622 Mbit/s，喀什站至昆明站为 200 Mbit/s，喀什站至北极站则为 450 Mbit/s。由此可见，我国已初步构建了高速卫星数据地面传输骨干网络，关键节点的带宽达到 Gbit/s 级别。鉴于试验目的在于模拟极端条件下的大数据量传输，同时须考量公网带宽资源的限制，因此地面数据传输链路的带宽被设定为 0.5 Gbit/s。这一设置不仅能够满足海量数据高速传输的试验要求，也与公网带宽的实际状况相符。这种设计合理考量了试验的严格性与场景的实用性。

4.5　遥感数据压缩编码预处理算法

为压缩光学图像数据，试验采用了联合图像专家组无损或近无损压缩标准（Joint Photographic Experts Group-Lossless Standard, JPEG-LS）[35]。JPEG-LS 通过构建像素预测模型来实现数据压缩，能够在不损失原始信息的前提下，获得较高的压缩比。在实验过程中，对分块处理的图像分别进行 JPEG-LS 编码，此过程不需要额外训练，且具有较低的编码复杂度。结果显示，JPEG-LS 能使图像数据的无损压缩比达到 4:1，有效降低了后续处理过程中的存储与传输负担。

4.6　遥感产品计算方法

试验对比了两种计算负载分配方案以评估性能：首先，传统的“后处理”计算模式应用于传统卫星遥感系统和卫星遥通融合系统，即将预处理后的数据集中发送至地面数据计算中心进行处理，这一过程存在计算链路的冗余问题；其次，提出的遥通一体化系统采用多星协同与星地协同的模式，该模式下构建了边缘通算的卫星星座，并与地面数据计算中心联合工作，实现了多星协同和星地协同。对于低复杂度的遥感分析任务，边缘星座可以直接在轨进行计算并生成产品；对于高复杂度的遥感分析任务，边缘星座可以先进行预处理和特征提炼，然后将中间结果发送至地面云中心进行深度学习模型的训练，以最终形成产品。全协同模式能够根据任务的复杂程度，灵活调配空间和地面的计算资源，从而提高处理效率。

4.7　仿真遥感试验性能对比结果

本次试验将探索并比较传统卫星遥感系统的“先上注，后处理”方法、卫星遥通融合系统的“后处理”方法以及卫星遥通算一体化多星协同、星地协同系统在单次遥感任务分配和时间分析上的性能，展示所提出的系统在实现分钟级遥感时效性上的优势，以期为实现“即传即感”的遥感愿景提供有力的支持。

图 8 展示的是传统卫星遥感系统“先上注，后处理”单次遥感任务流程及时间分析，此流程可能导致遥感时效性不佳，遥感周期为数日乃至数周。在首个阶段，即遥感指令的上注过程中，由于全球信关站的分布限制，只能在卫星飞越国内信关站并位于其可视范围内时进行指令传输，此等待过程可能持续多日。举例来说，针对高分一号卫星的星载遥感数据预处理环节，在单次过顶任务中，卫星可能会收集 80~320 GB 的原始数据。考虑到所搭载的 BAE Systems RAD750 处理器（0.133 GHz）的计算能力，以及应用的 JPEG-LS（压缩比为 4:1），卫星能够在完成数据采集后有效地进行数据压缩工作，预处理数据量为 20~80 GB，处理时间需要 10~40 min。卫星的过顶重访周期及其时间配置同样受限于全球信关站布局，即使预处理数据已经准备完毕，卫星仍需等待数天，直至进入下一信关站的可视窗口以便回传数据。在星地传输阶段，借助 Ka 频段最高 1 Gbit/s 的带宽资源，即使处理 80 GB 的数据量，传输时间也不超过 11 min。而在信关站传输阶段，即使带宽下降至 0.5 Gbit/s，将相同数据量传至地面数据计算中心的时间也不会超过 22 min。地面数据处理环节中，鉴于地面数据计算中心的高性能计算资源，处理数十 GB 的数据量，遥感产品的生成和分发均能在极短时间内完成。总体来看，传统的遥感系统在遥感时延方面可能需要数日至数周，这主要是由于系统受信关站分布和卫星重访周期的限制，其必须提前完成任务指令上注并等待数据的回传，同时还要处理大量数据对于星载和星地通信链路的负载压力，以及地面处理流程的效率问题。

如图 9 所示，遥通融合系统通过通信卫星星座实现对全球地表的无死角覆盖，并采纳了“后处理”机制进行单次遥感任务的分配以及时间效率分析，实现了小时级别的遥感响应时间。相较于传统遥感系统，该系统的显著优势为：首先，通信卫星星座在全球范围内迅速接收来自地面站的遥感指令，由于指令数据量小且星间链路传输时延短，因此能即时完成遥感指令的上注；其次，该系统在遥感数据的初步处理和回传阶段无须等待卫星过顶，其数据可通过星间链路直接传输至地面。除此之外，其他流程与传统遥感系统相同。总体而言，遥通融合系统在处理单次遥感任务时，克服了传统系统受信关站全球布局的限制，但在处理大规模数据量及传输计算链路方面仍存在挑战，尽管具有小时级响应时间，但对于分钟级遥感任务的响应速度要求尚有差距。

如图 10 所示，卫星遥通算一体化的多星协同、星地协同系统，有效地整合了星间及星地资源，明显削减了遥感任务的响应时间，实现了分钟级别的遥感响应时间。该系

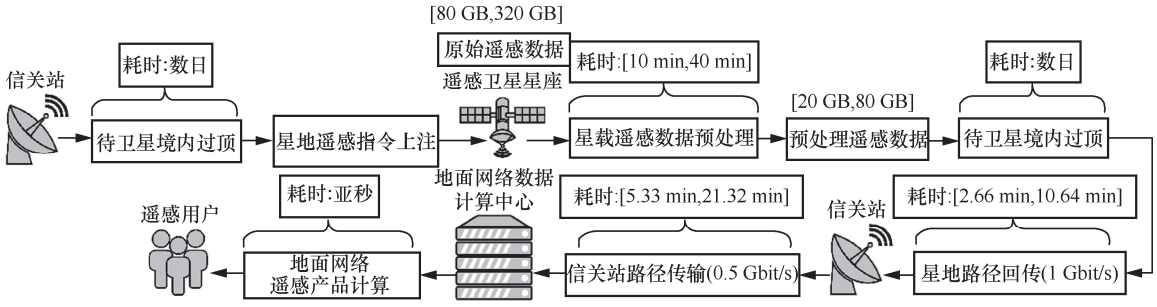


图 8　传统卫星遥感系统“先上注，后处理”单次遥感任务流程及时间分析

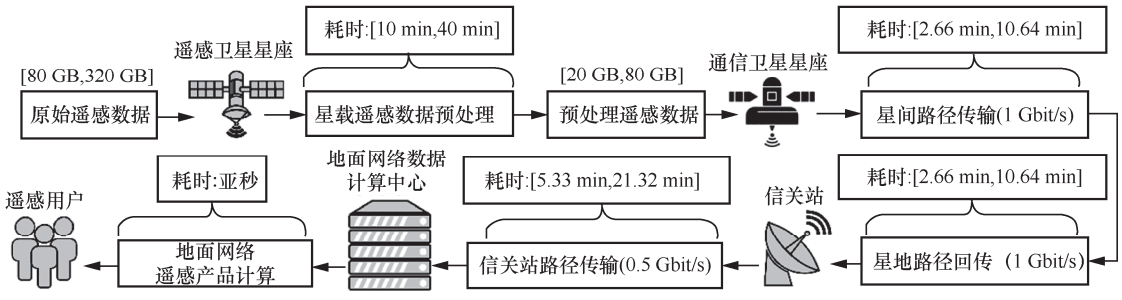


图 9　遥通融合系统“后处理”单次遥感任务流程及时间分析

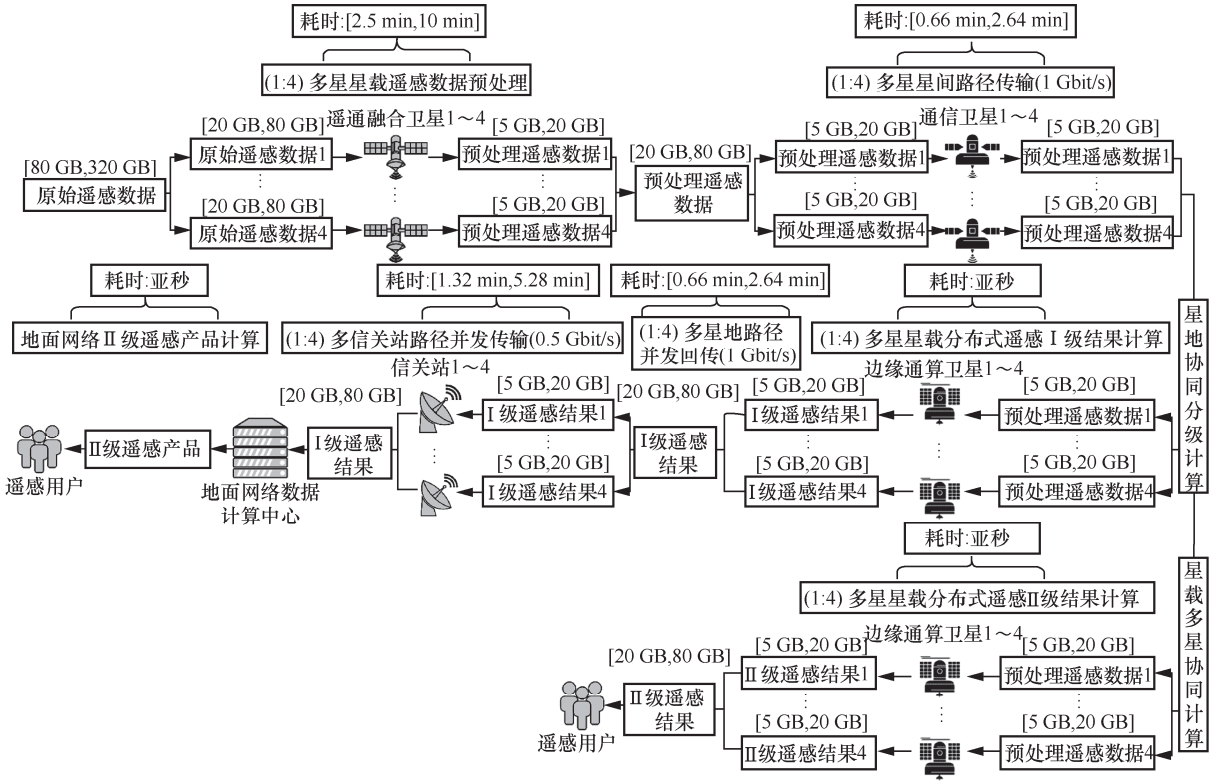


图 10　卫星遥通算一体化多星协同、星地协同系统单次遥感任务流程及时间分析

统与前文提及的其他两种遥感系统相比具有显著的区别。首先，在遥感数据的预处理阶段，该系统利用遥感与通信功能融合的卫星星座，完成了多星协同的星载遥感数据预处理任务，将处理时间缩减为 2.5~10 min；其次，遥感数据在经由通信卫星星座进行传输时，通信卫星星座实现了高效的星间数据传输，进一步缩短传输时间为 0.66~2.64 min。此外，系统根据遥感任务的计算复杂度采取了分级计算策略。对于高计算复杂度的遥感任务，系统通过星地协同的分级计算，边缘通算卫星星座首先完成多星协同的星载分布式 I 级结果计算，此阶段耗时为亚秒级。随后，遥感数据通过多星和地面的并发传输方式及多信关站并发传输，将整个传输时间控制在 8 min 左右。在 II 级遥感产品的计算环节，数据传输至地面数据计算中心后，快速完成计算处理，此环节亦为亚秒级。对于低计算复杂度遥感任务，可通过星载系统直接协同计算并生成最终遥感产品，耗时依旧保持在亚秒级，并直接向用户传输。因此，遥通算一体化的多星协同、星地协同系统规避了过大的数据流冲击，显著降低了处理时延，实现了遥感数据分钟级的处理时效，构建了一条高效且连贯的端到端处理流程。该体系展示了在实时遥感处理领域中的出色能力，并在紧急观测、灾害监测等应急遥感场景中展现了潜在的应用价值。卫星遥感系统遥感任务仿真结果特性对比见表 11。

表 11　卫星遥感系统遥感任务仿真结果特性对比

卫星遥感系统	遥感任务处理方式	特性	遥感时效性
传统卫星遥感系统	先上注，后处理	（1）地面信关站布局受限→先上注海量遥感数据冲击→星载性能受限、星地链路带宽受限； （2）遥感数据传输处理链路冗余→后处理→处理时延长	差 （数日乃至数周）
遥通融合卫星系统	后处理	（1）海量遥感数据冲击→星载性能受限、星地链路带宽受限； （2）遥感数据传输处理链路冗余→后处理→处理时延长	较差（小时级）
多星协同、星地协同遥通算一体化卫星系统	多星协同、 星地协同	（1）纵向协同：多星协同、星地协同遥通算； （2）横向协同：遥通算联动协同、互馈增强	优（分钟级）

5　结束语

鉴于遥感业务的爆炸式增长以及应急遥感业务向常态化发展的趋势，现有卫星遥感系统在时效性方面的困境凸显，迫切需要新型的实时遥感系统架构。本文提出了一个集卫星遥感、通信和计算于一体的系统架构，实现了“多星协同、星地协同”的遥感任务模式，能够有效满足“即时遥感、即时传输”的遥感需求。基于该架构，本文与现行卫星遥感系统设计了一系列遥感任务时效性对比试验，结果表明文本所提出的架构展现了较好的实时遥感处理能力。

参考文献

[1] 王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256-1263.
WANG M, WU Q Y, XIAO J, et al. Key technologies on “cloud-edge-end” collaborative intelligent service of low-orbit giant constellation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1256-1263.

[2] 柯知非, 黄石生, 李玉良, 等. 低轨大型遥感星座发展现状及其关键技术[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(1): 93-101.
KE Z F, HUANG S S, LI Y L, et al. Research on the development status and key technologies of large LEO remote sensing constellations[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(1): 93-101.

[3] CHI M M, PLAZA A, BENEDIKTSSON J A, et al. Big data for remote sensing: challenges and opportunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(11): 2207-2219.

[4] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.

[5] 彭会湘, 陈金勇, 杨斌, 等. 6G 通信时代的卫星遥感系统展望[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 523-529.
PENG H X, CHEN J Y, YANG B, et al. Prospect of satellite remote sensing system in 6G communication[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 523-529.

[6] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合：架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.

[7] 许文嘉, 王一旭, 彭木根. 卫星遥感与 6G 通信遥感一体化[J]. 电信科学, 2023, 39(4): 60-70.
XU W J, WANG Y X, PENG M G. Satellite remote sensing and the integration of 6G communication and remote sensing[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(4): 60-70.

[8] GUPTA R P. Remote sensing geology[M]. Berlin: Springer, 2003.

[9] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络：组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 177-189.

[10] WANG S G, LI Q. Satellite computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(24): 22514-22529.

[11] 李安, 黄鹏, 石璐, 等. 中国遥感卫星地面站卫星地面系统的发展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 251-266.
LI A, HUANG P, SHI L, et al. Update of remote sensing satellite ground system of China remote sensing satellite ground station[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 251-266.

[12] 杨正磊, 张海威, 王瑞花, 等. 应急条件下星地资源综合运用模式研究[J]. 航天器工程, 2017, 26(1): 6-11.
YANG Z L, ZHANG H W, WANG R H, et al. Research on integrated handling mode of satellite and station resources under emergency conditions[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(1): 6-11.

[13] QUIRITA V A A, DA COSTA G A O P, HAPP P N, et al. A new cloud computing architecture for the classification of remote sensing data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(2): 409-416.

[14] JAY S, BARET F, DUTARTRE D, et al. Exploiting the centimeter resolution of UAV multispectral imagery to improve remote-sensing estimates of canopy structure and biochemistry in sugar beet crops[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231.

[15] DENBY B, LUCIA B. Orbital edge computing: nanosatellite constellations as a new class of computer system[C]//Proceedings of the Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM, 2020: 939-954.

[16] BAI L, ZHU L N, ZHANG X J, et al. Multi-satellite relay transmis-

sion in 5G: concepts, techniques, and challenges[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 38-44.

[17] FU S, GAO J, ZHAO L. Collaborative multi-resource allocation in terrestrial-satellite network towards 6G[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7057-7071.

[18] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的 6G 通感算融合架构、技术与挑战[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20.
JING Y, JIANG C X, ZHAN Y F. 6G communication, sensing and computing integration for satellite communication: architectures, technologies and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 12-20.

[19] 郭凯, 崔潇潇, 钟江山等. SpaceX“星盾”系统建设及应用浅析[J]. 航天电子对抗, 2023, 39 (4): 55-58.
GUO K, CUI X X, ZHONG J S, et al. Analysis on the construction and application of SpaceX “Starshield” system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2023, 39 (4): 55-58.

[20] JIA M, ZHU S Y, WANG L F, et al. Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN[J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23(2): 285-300.

[21] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.

[22] HERRERA J G, BOTERO J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(3): 518-532.

[23] YAN Q, YU F R, GONG Q X, et al. Software-defined networking (SDN) and distributed denial of service (DDoS) attacks in cloud computing environments: a survey, some research issues, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 602-622.

[24] CARPENTIERI B, CASTIGLIONE A, SANTIS A D, et al. One-pass lossless data hiding and compression of remote sensing data[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 90: 222-239.

[25] LI F F, LUKIN V, IEREMEIEV O, et al. Quality control for the BPG lossy compression of three-channel remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1824.

[26] SHI C P, WANG L G, ZHANG J P, et al. Remote sensing image compression based on direction lifting-based block transform with content-driven quadtree coding adaptively[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 999.

[27] ÁLVAREZ-CORTÉS S, SERRA-SAGRISTÀ J, BARTRINA-RAPESTA J, et al. Regression wavelet analysis for near-lossless remote sensing data compression[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 790-798.

[28] BÁSCONES D, GONZÁLEZ C, MOZOS D. Hyperspectral image compression using vector quantization, PCA and JPEG2000[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 907.

[29] DEAN J, CORRADO S J, MONGA R, et al. Large scale distributed deep networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 1(12): 1223-1231.

[30] KRIZHEVSKY A. One weird trick for parallelizing convolutional neural networks[EB]. 2014.

[31] HUANG G, LIU Z, MAATEN L, et al. Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2261-2269.

[32] WANG Y H, SUN Q B. Task offloading and resource allocation in satellite terrestrial networks: a deep deterministic policy gradient approach[C]//International Conference on Big Data Intelligence and Computing. Singapore: Springer, 2023: 365-378.

[33] ZHANG X Y, LIU J, ZHANG R, et al. Energy-efficient computation peer offloading in satellite edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023(4): 1-15.

[34] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5-9.
BAI Z G. Technical characteristics of Gaofen-1 satellite[J]. Aerospace China, 2013(8): 5-9.

[35] WEINBERGER M J, SEROUSSI G, SAPIRO G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2000, 9(8): 1309-1324.

[作者简介]



蒋忠元（1988− ），男，博士，西安电子科技大学网络与信息安全学院教授，博士生导师，主要研究方向为空天地海一体化网络、空间信息遥通算融合、复杂网络传输动力学等。



王森（1998– ），男，西安电子科技大学网络与信息安全学院博士生，主要研究方向为空天地海一体化网络、低轨巨型星座路由设计等。



王启舟（1994 – ），男，西安交通大学陕西省人工智能联合（重点）实验室助理研究员，西安市社会智能与复杂数据处理重点实验室工程师，主要研究方向为遥感图像处理、机器学习等。



曹相湧（1990– ），男，博士，西安交通大学计算机科学与技术学院副教授、博士生导师，主要研究方向为遥感图像处理、机器学习、深度生成模型等。



侯兴松（1972– ），男，博士，西安交通大学电子与信息工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为视频/图像编码、小波分析、稀疏表示、压缩感知和雷达信号处理等。



雷磊（1985– ），男，博士，西安交通大学信息与通信工程学院副教授、博士生导师，主要研究方向为星地融合网络资源优化、6G 低轨卫星系统干扰管控、分布式机器学习、通感算一体优化等。



孙冬伟（1994– ），男，西安交通大学计算机科学与技术学院博士生，主要研究方向为遥感图像处理、机器学习等。



李兴华（1978– ），男，博士，西安电子科技大学网络与信息安全学院教授、博士生导师，主要研究方向为网络与信息安全、安全协议形式化等。



马建峰（1963– ），男，博士，西安电子科技大学网络与信息安全学院教授，主要研究方向为无线网络安全、移动智能系统安全等。