DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.03.032

面向商业航天的空天时空智能体系架构

陈雨浓[1]，邓悦[2]，岳皓[3]，邵振峰[1]，李德仁[1*]

（1. 测绘遥感信息工程全国重点实验室，武汉 430072；2. 武汉大学质量发展战略研究院，武汉 430072；
3. 测绘遥感信息工程国家重点实验室深圳研发中心，广东深圳 518057）

摘要：当前的通信、导航、遥感（“通导遥”）卫星系统彼此割裂，难以满足全域实时响应、智能自主运行、普惠大众服务的高质量应用需求；创新定位、导航、授时、遥感、通信（PNTRC）服务，建立“通导遥”一体化的空天时空智能体系，是破解上述矛盾的有效突破方向，商业航天则为这一体系建设提供了核心载体与产业基础。本文梳理了空天时空智能的研究背景、相关技术的研究进展，辨析了技术能力、体系结构性等方面的发展挑战，论述了商业航天对空天时空智能的支撑作用、空天时空智能对商业航天的赋能作用。进一步提出了面向商业航天的空天时空智能五维增强架构，涵盖从全量下传到在轨智能筛选的感知增强层、从多源异构到知识融合的认知增强层、从数据销售到决策输出的服务增强层、从单星单能到“通导遥”一体化的系统集成层、从链式供给到生态协同的价值共创层。结合“珞珈三号”“东方慧眼”等工程实践，选取全球、区域、城市、个人四个具有递进关系的典型场景，分析了空天时空智能五维增强架构的适用性，确认可支撑“数据即服务”“平台即服务”“决策即服务”、能力共建等商业模式。从系统集成、服务流程、服务模式、标准体系、商业模式、人才培养等方面提出了空天时空智能五维增强架构规模化应用的措施建议，为商业航天产业布局优化提供理论支持与实践参考。

关键词：空天时空智能；商业航天；总体架构；“通导遥”一体化；规模化应用

中图分类号：T01　　**文献标识码：**A

Space-Based Spatiotemporal Intelligent System Architecture for Commercial Aerospace

Chen Yunong[1], Deng Yue[2], Yue Hao[3], Shao Zhenfeng[1], Li Deren[1*]

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430072, China; 2. Wuhan University Institute of Quality Development Strategy, Wuhan 430072, China; 3. Shenzhen Research & Development Centre, State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

Abstract: Current communication, navigation, and remote sensing satellite systems remain largely isolated from one another, leading to a prominent contradiction with the high-quality application demands for all-domain real-time response, intelligent autonomous operation, and inclusive public services. Promoting innovation in positioning, navigation, timing, remote sensing, and communication (PNTRC) services and establishing a space-based spatiotemporal intelligent system that integrates communication, navigation and remote sensing represent a key direction for resolving this contradiction. Commercial aerospace serves as the core carrier and industrial foundation for building such a system. This study reviews the research background and technical progress of space-based

收稿日期：2026-03-15；**修回日期：**2026-05-25

通讯作者：*李德仁，测绘遥感信息工程全国重点实验室教授，中国科学院院士、中国工程院院士，研究方向为地球空间信息学和时空智能学；E-mail: drli@whu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“广东省发展商业航天若干关键技术和产业规划研究”(2025-DFZD-26)；国家重点研发计划项目(2023YFB3906102)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

spatiotemporal intelligence, analyzes development challenges regarding technical capabilities and system architecture, and discusses the supporting role of commercial aerospace in space-based spatiotemporal intelligence as well as the enabling role of space-based spatiotemporal intelligence for commercial aerospace. Furthermore, a five-dimensional enhancement architecture for space-based spatiotemporal intelligence oriented toward commercial aerospace is proposed, comprising a perception enhancement layer evolving from full downlink transmission to on-orbit intelligent screening; a cognition enhancement layer evolving from multi-source heterogeneous data to knowledge fusion; a service enhancement layer evolving from data sales to decision output; a system integration layer evolving from single-satellite single-function to integrated communication, navigation, and remote sensing; and a value co-creation layer evolving from chain-based supply to ecosystem collaboration. Drawing on engineering practices such as the Luojia-3 and Oriental Smart Eye projects, four progressive typical scenarios (i.e., global, regional, urban, and individual) are selected to analyze the applicability of the five-dimensional enhancement architecture, confirming that it can support business models such as Data-as-a-Service, Platform-as-a-Service, Decision-as-a-Service, and capability co-construction. Finally, recommendations for large-scale application of the five-dimensional enhancement architecture are proposed from the perspectives of system integration, service processes, service models, standards systems, business models, and talent cultivation, providing theoretical support and practical references for optimizing the industrial layout of commercial aerospace.

Keywords: space-based spatiotemporal intelligence; commercial aerospace; system architecture; integrated communication, navigation, and remote sensing; large-scale application

一、前言

当前，商业航天正在经历由政府主导向市场驱动的转型，运载火箭发射成本持续降低、卫星研制小型化和标准化渐成趋势、星座组网技术趋于成熟，推动大规模低轨卫星星座走向工程实践[1-2]。产业变革赋予时空信息服务以全新发展机遇，表现在卫星重访频次显著提升、任务调度机制更加灵活、服务接入门槛大幅降低。然而，发展机遇同步折射出系统性的协同、服务和生态瓶颈。虽然北斗卫星导航系统实现全球服务覆盖，各类遥感卫星星座加速部署，低轨宽带通信星座逐步建成[3]，但是通信、导航、遥感（“通导遥”）卫星系统独立运行，用户一体化获取定位、遥感观测、通信传输服务需要跨越多个平台和系统，数据链路冗长且效率低下[4]。“通导遥”卫星系统彼此割裂，与全域实时响应、智能自主运行、普惠大众服务的高质量应用需求之间存在突出矛盾。

商业航天的产业变革正在重塑时空信息服务的供给方式与价值逻辑。在产业宏观层面，商业航天逐步从能力建设向应用服务生态延伸，如低轨星座的规模化部署为“通导遥”融合提供了物理基础[2-3]。在概念与架构层面，时空智能作为测绘遥感与地理信息科学顺应数字化、智能化趋势的高阶集成形态，以自动感知和认知的方式为人工智能（AI）开辟了应用场景[5]，通过星上处理与“通导遥”载荷协同初步验证了一体化技术路线的可行性[6-7]。在应用层面，已有研究展示了特定场景中的融合突破，如在轨智能处理、北斗卫星导航系统与第五代移动通信（5G）融合定位、无人机巡检示范等[8-11]。也要注意到，相关进展多是单点技术验证或特定行业示范，尚未对数据感知、信息认知、服务交付、系统集成、产业生态进行体系化审视，存在着从工程可行到体系成熟之间的能力空白。

本文立足商业航天变革背景、把握现行技术能力基础，梳理空天时空智能面临的技术约束和体系架构缺失，对时空智能学中“感知 – 认知 – 决策”闭环进行架构层面的工程化扩展，提出统筹感知、认知、服务、集成、生态的空天时空智能五维增强架构，以为分散的单项技术提供系统级的整合路径，推动时空信息服务从数据交付向决策交付升级。通过工程案例与典型场景分析，检验所提架构的合理性与有效性，探讨空天时空智能体系规模化应用的务实举措。

二、空天时空智能研究背景和技术应用进展

（一）空天时空智能的研究背景

时空智能是测绘遥感、地理信息、AI等学科交叉融合的结果，可解答何时、何地、何种目标、何种变化、何种机理、何种决策等核心问题，推动以北斗卫星导航系统为中心的定位、导航、授时（PNT）服务朝着定位、导航、授时、遥感、通信（PNTRC）一体化方向演进，提供真实世界的时空锚点[12-14]。这一理论概念与地球系统科学的数据驱动范式转型高度契合，旨在通过感知和认知从海量数据中提取可解释规律并服务决策[15-16]。

空天时空智能是时空智能在空天维度的具体化

与工程化表达，以对地观测卫星为基础，融合星座编排、星间 / 星地任务调度、在轨智能处理、全球信息分发等关键技术，构建多源感知、高频观测、智能决策、快速响应的一体化系统；包括在轨星座、任务规划与调度、在轨智能处理、星间与星地通信网络、地面信息融合与分发平台等核心部分，以持续感知全球自然环境和人类活动的动态变化，为国土安全、灾害预警、生态保护等提供全时空智能支撑[17]。近年来，低轨卫星导航增强、星上智能处理、北斗短报文等技术得到初步验证[18-19]，如美国的 Planet 鸽群和 SpaceX 星链、我国的“吉林一号”“东方慧眼”等星座代表了从单星运行向多星协同、星群组网的演进方向。然而，从单点技术突破迈向规模化、可复用的服务体系仍面临系统性鸿沟，当前工作多聚焦单一环节的性能提升，而欠缺可统筹并整合感知、认知、服务、集成、生态的顶层架构[20]。因此，研究并提出一体化架构，对面向商业航天的空天时空智能深化发展具有理论指导与实践支撑价值。

（二）空天时空智能相关技术应用进展

PNTRC 技术是空天时空智能体系的基础，国内外主要采用导航增强型、通信增强型、系统原生融合型 3 条发展路径，本质区别在于融合操作是事后叠加、被动复用还是原生设计（见表 1）。导航增强型以卫星导航系统为核心来叠加通信或遥感功能，依托成熟的卫星导航星座，部署成本较低。通信复用型以低轨通信星座为载体，对现有通信信号进行机会式利用来辅助导航和感知，无需改造星座即可快速实现能力增强。系统原生融合型在星座或卫星设计时即将“通导遥”功能作为一体化目标进行统筹规划，支持深度协同和资源共享，是“通导遥”一体化的理想形态。

1. 国际研究

美国 GPS III 在导航核心功能之外集成了应急通信载荷，可在无地面网络区域将遇险信号转发至救援协调中心，实现导航与通信的初步耦合[21]。然而，GPS III 本身不配置遥感载荷，依赖 Landsat、Sentinel 等独立卫星获得遥感能力。在通信卫星的导航复用方面，应用软件定义接收机解析了 SpaceX 星链的下行信号，在无 GPS 环境下实现数十米级的二维定位，体现了导航备用的可行性[22]，进一步提出了利用星链信号多普勒频移进行伪距测量的方法[23]；梳理了基于低轨通信卫星机会信号的 PNT 研究现状以及通过通信卫星小幅改进、多源融合来提升一体化性能的潜力[24]。这些研究均为“被动”利用现有通信信号，而星链在系统设计层面并未为导航或遥感功能预留接口。欧洲伽利略系统在高精度定位与通信融合方面走在前列，通过 E6-B 信号免费播发分米级精密单点定位改正数，用户无需地面

表 1　“通导遥”一体化技术路线对比

对比维度	导航增强型	通信复用型	系统原生融合型
融合层次	功能叠加	信号复用	系统原生集成
代表系统	GPS III、北斗三号	星链、新一代铱星系统	QZSS、PWSA、“东方慧眼”
核心优势	依托成熟导航星座，部署成本低	无需改造星座，快速实现辅助 PNT；规模大、覆盖广	资源共享最优，可实现“通导遥”深度协同和一体化服务
导航能力	高精度（原生）	辅助级	高精度至辅助级（按需设计）
通信能力	窄带 / 短报文（辅助功能）	全球宽带（原生设计）	原生集成，按需配置
遥感能力	无原生遥感，依赖外部系统	无专用遥感载荷，可有限感知来自空间态势或机会信号	集成专用光学 / SAR 遥感载荷
典型进展与局限	GPS III 搭载 DASS 应急通信载荷，北斗三号具备短报文功能；但功能以叠加为主，协同不足，无原生遥感	星链的下行信号支持 10 米级定位与纳秒级授时，SpaceX 公司已提议开展 PNT 服务；利用星敏感器跟踪空间目标，无原生遥感能力	QZSS 集成导航增强、短报文、光学遥感功能，但覆盖范围有限；PWSA 通过多层架构实现通信、导航、跟踪监视、战斗管理，主要面向军事应用；“东方慧眼”发展全球范围内实时智能服务，工程复杂度高

注：GPS 表示全球定位系统；QZSS 表示准天顶卫星系统；PWSA 表示大规模弹性作战太空体系；SAR 表示合成孔径雷达；DASS 表示遇险报警卫星系统。

网络即可获取高精度位置，本质上是“导航+通信”融合服务。伽利略系统的搜索救援功能与GPS III类似，支持反向链路通信[25-26]，但并未集成遥感载荷，与遥感卫星的协同依赖外部系统。日本QZSS是目前最接近“通导遥”一体化理念的卫星系统，提供了高精度定位（厘米级增强信号L6）、短报文通信、光学遥感功能，“一站式”服务架构也为“通导遥”融合应用提供了工程示范[27-29]。然而，QZSS仅由4颗卫星组成，覆盖范围局限在亚太地区且遥感能力有限，尚不具备全球实时服务能力。此外，俄罗斯格洛纳斯-K卫星增加了码分多址信号和搜索救援载荷，印度的NavIC系统主要面向印度及周边区域提供标准定位服务和短报文通信功能，两个系统都未集成遥感功能，“通导遥”融合进展相对有限[30-31]。整体上，现有的国际实践或局限于功能叠加而未能实现系统层面的“通导遥”融合应用，或受制于星座规模及覆盖能力而缺乏系统级融合的架构设计。

近年来，国际“通导遥”一体化架构研究主要分为技术系统架构、生态系统架构两类。技术系统架构研究聚焦信号设计、载荷集成、星间组网以着力提升系统物理性能，如通信导航集成网络、基于低地球轨道卫星超大星座的“通导遥”集成框架等为“通导遥”一体化建模提供了新视角[32-33]，PWSA以光学星间链路为骨干并采用了分阶段螺旋部署的发展思路，“通导遥算数”多圈层方案按轨道高度进行功能分层分配[34]，分布式传感、定位、通信集成系统依托星际链路实现星际协作，通过共享资源和协同设计获得吞吐量、定位精度、传感鲁棒性的协同增益[35]。生态系统架构关注决策级服务与产业生态，相关研究较薄弱[36]，主要解决集成“通导遥”功能的技术问题（而未能提出系统性的框架），探讨输出决策价值并构建可持续生态，以引导“通导遥”一体化从技术“拼凑”层次提升至能力融合与价值共创的高维体系。

2. 国内研究

我国在“通导遥”一体化方面形成了“技术验证 – 国家基础设施 – 商业星座”多路径并行的发展格局。鸿雁星座是国内最早规划的低轨通信星座，初期以全球通信覆盖为核心目标，后期增加了导航增强载荷[37]；虽然因商业竞争消解、技术路线调整而将部分功能整合到国网星座，但作为早期探索为后续发展积累了工程经验。北斗三号系统本身部分具备“通导遥”一体化能力，如短报文通信功能支持用户之间的点对点通信和位置报告[38]，通过星基增强、精密单点定位服务提供了高精度导航[39]；主要采用中圆轨道、地球静止轨道（GEO）卫星，缺乏低轨遥感载荷，相应“遥感”能力依赖与其他遥感星座的数据融合。近年来，北斗卫星与低轨遥感卫星的协同成为研究热点，如利用北斗GEO卫星信号进行干涉测量等[40]。

在商业遥感星座方面，“吉林一号”是全球最大的亚米级商业遥感星座，在轨卫星数量为144颗（2025年），具备每天数十次的全球任意地点重访能力；星上智能处理取得显著进展，包括星上目标检测与实时下传技术、利用星座进行快速三维重建方法[41]；核心功能仍是遥感，而通信与导航仅是辅助。女娲星座由低轨雷达遥感卫星构成，在方案设计时即考虑了星间链路和星上快速处理，预留了通信与导航增强接口；利用试验星数据干涉测量重建数字高程模型并验证精度的研究也在逐步开展[42]。“东方慧眼”星座规划了完整的“通导遥”一体化能力，由258颗低轨卫星组成，采用软件定义多模网格架构，支持星上智能处理、星间激光互联、定制化任务调度，将面向全球任意区域提供5分钟级的实时智能服务[13]；在架构层面强调“感知 – 认知 – 服务”一体化，被视为PNTRC概念的系统性应用。

在单星技术验证层面，“珞珈一号”（2018年）首次验证了低轨卫星对全球导航卫星系统（GNSS）信号的接收与增强能力，实现厘米级精密的定轨，为PNTRC概念构建提供了轨道基准[43]。“珞珈二号”（2022年）首次实现Ka频段高分辨率SAR成像，完成了通信导航一体化实验，验证了同一卫星平台上部署遥感和通信链路的可行性[44]。“珞珈三号”（2023年）将星上智能处理推向工程应用，搭载的AI处理器在轨完成云检测、目标识别等任务，将遥感信息从获取到用户终端的延迟缩短至分钟级[45]；支持星地链路的实时传输，初步实现“遥感+通信”闭环。然而，上述卫星仅以单星、双星模式开展了技术验证，尚未实现组网运行，大规模星座协同调度难题仍待攻克。

3. 国内外技术应用进展对比

国内外的空天时空智能技术整体呈现功能叠加

为主、融合应用为辅的发展态势。与依赖GPS III、星链开展“被动”利用的国际路径相比，我国的技术探索更为积极和系统，以“东方慧眼”星座的顶层设计，女娲星座、“吉林一号”等工程进展为代表。然而，数量不等于质量、部署不等于一体化，相关工程实践虽然证明“通导遥”一体化的技术可行性，但也暴露出当前研究的局限性：尚未触及大规模组网状态下协同调度、资源分配、服务质量管理等方面的问题；工程验证与理论提炼脱节，缺少源自顶层设计、可重复使用的架构设计原则；多面向技术性问题，而对服务模式、商业可行性、产业生态等关注不足。

上述研究局限性并非源于技术能力的根本欠缺，实际上星上AI推理、在轨压缩、星间激光通信、“通导遥”载荷集成等关键技术已有良好进展。例如，现有技术可以在轨精准提取遥感影像的目标区域，处理精度已与地面处理相当[46]；在星上算力受限环境下，在轨云检测与目标检测准确率超过90%[47]；基于任务驱动的智能压缩方法在多型卫星上实现静态图像30倍以上、动态视频200倍以上的压缩倍率[48]；在功能异构星座之间的协同在轨处理方面，通过星间激光链路高效开展数据交换，为“通导遥”一体化星座的自主协同确立技术基础[49]。可见，高效完成星上多源异构时空数据融合、实现从数据销售向决策输出的服务转型，“通导遥”功能在统一框架下集成调度等课题，既与技术能力相关，又涉及产业生态与顶层设计。

三、商业航天背景下空天时空智能的发展挑战与机遇

虽然国内外在空天时空智能体系方面形成了导航增强型、通信增强型、系统原生融合型3条发展路径（导航增强型提供更优的定位精度，通信增强型扩展数据传输渠道，系统原生融合型实现多载荷共平台），但现有探索存在共性局限：服务模式仍以信号或数据为中心，而非以用户决策为中心；未能系统解决从感知到认知再到服务的闭环问题。在提出可规模化、可持续、可复用的空天时空智能体系架构方案之前，有必要厘清当前技术能力边界、服务体系存在的结构性问题：前者是外部约束，不作为本研究的关注重心；后者是内部缺陷，作为本研究开展架构设计的靶向目标。当然，技术约束与结构缺陷并非完全分立，而是存在内在耦合与相互关联，需要在资源约束条件下科学界定问题解决的优先级。就突破难度而言，技术约束属于基础科学研究、工程技术实现层面的根本性难题；从效益产出来看，架构优化具有的杠杆效应在相关实践中得到充分验证；就逻辑依赖而论，技术攻关的实施方向需由顶层架构设计进行牵引。因此，本研究关注服务体系的结构性缺陷，以架构优化为切入点推动空天时空智能体系从能力构建向价值创造的范式转型。

（一）商业航天背景下空天时空智能的发展挑战

1. 技术能力约束

在规定的时间内将所需要地点的正确数据、信息和知识传递给需要的人，是空天时空智能遵循的基本原则[17]。然而，一些技术能力缺失且短期内难以突破，实际上构成了约束条件，需要在架构设计中采取分级策略、融合替代、过渡方案进行合理规避（见表2）。

星上实时SAR处理面临算力、功耗的双重限制，复杂算法难以在轨运行，目前应用仅限于粗筛或特定目标检测。该约束直接限制“何种变化”“何种机理”的实时回答能力，导致用户无法在规定的时间内获取正确的信息与知识，迫使在认知增强层采用“星上粗筛+地面精处理”的分级策略。星间激光链路技术尚处验证阶段，开展大规模部署面临捕获跟踪、大气湍流补偿等工程难题，限制“何时”“何地”的全局覆盖与即时回传能力，影响所需要地点的数据可达性，尤其制约全球尺度场景的连续监测。高精度惯性测量单元的功耗与体积问题制约消费级终端的连续定位能力，直接影响“何地”在室内、地下等GNSS盲区的连续回答，无法保障用户在规定的时间内获得所需要地点的正确数据。星载通用AI算力有限，深度神经网络模型在轨运行需要专用加速芯片，复杂语义理解仍需在地面执行，限制“何种目标”“何种决策”的在轨实时推理，影响正确知识的即时生成。

2. 体系结构性不足

一是系统孤立。“通导遥”卫星分别由不同部门管理，各自的数据格式、传输协议、服务接口通常不兼容。用户需要分别接入、自行融合才能同时

表2　空天时空智能的技术约束和架构设计限制

技术领域	现状描述	架构设计限制
卫星平台与载荷	高精度姿态控制、长寿命电推进、灵活可重构载荷等技术有待工程成熟，SAR载荷小型化与轻量化未能完全实现，多载荷共星集成存在电磁兼容、热控等工程难题	制约星座的规模化部署能力和任务灵活性；多载荷共星设计需预留足够的隔离与补偿空间，增加系统复杂度
星上智能处理	星载抗辐射处理器算力远低于地面同期产品，AI加速芯片的航天级验证与部署尚处起步阶段，SAR数据星上实时成像困难，星上存储容量有限	制约星上实时处理的数据类型、算法复杂度和处理深度；复杂分析任务依赖地面，导致端到端延迟增加
星地通信链路	星地链路带宽存在瓶颈，高分辨率数据下传排队现象普遍存在；部分区域地面站覆盖不足	制约全球实时数据回传能力；地面管控负担重，难以支撑大规模星座在高效运营、应急场景下的数据传输时效
星座运行与自主管理	大规模星座的自主任务规划、碰撞规避、资源调度算法尚不成熟，星间激光链路捕获跟踪、大气湍流补偿、长期可靠性等关键技术处于验证阶段，星座健康管理与故障自恢复能力有限	制约星座的自主运行水平和长期稳定性，星座自主组网与协同观测难以实时实现
终端定位与感知	全球导航卫星系统信号在室内、地下、城市峡谷等环境易受遮挡；高精度惯性测量单元功耗高、体积大，难以集成至消费级终端；多源融合定位算法在功耗与精度之间平衡困难	制约消费级终端在复杂环境下的连续高精度定位能力，终端侧定位性能成为服务体验的瓶颈环节
数据处理与算法	多源异构数据时空基准统一、语义对齐、质量互验等预处理环节依赖人工干预，深度学习模型泛化能力不足，大模型对物理规律的嵌入欠缺且可解释性差，高质量标注样本稀缺	制约全自动、高可靠的时空认知能力；人工介入环节多，不利于服务效率提高和规模化推广
数据安全与隐私保护	高价值时空数据采集成本高且涉及国家安全与商业机密，开放共享与保密要求之间存在矛盾，数据脱敏、分级授权、可信流通等治理机制尚不健全	制约数据的跨域流动与开放利用；架构设计需内置安全与隐私保护机制，增加系统复杂度

获取3类服务。在应急场景下，灾区影像、救援队伍位置、通信保障分属不同系统，协同效率偏低，与空天时空智能遵循的基本原则相悖，即用户无法在规定的时间内从所需要地点获得融合后的正确数据、信息与知识；“何种决策”的协同效率低下，“需要的人”被系统壁垒阻隔。

二是服务链路冗长。传统的卫星服务链路涉及卫星采集、地面站接收、处理中心加工、分发平台、用户终端等环节，端到端延迟通常为数小时至数天。这就导致“何时”的回答严重滞后，用户无法及时获取“何种变化”的动态信息，决策窗口被压缩。“珞珈三号”虽然验证了分钟级服务能力，但仅限于单星实施和特定任务，尚未转化为标准化流程。

三是服务模式单一。产业仍以销售影像数据为主，用户购买的主要是原始或初级产品。以农业保险定损场景为例，保险公司真正需要的是“该区域受灾面积大小、经济损失多少”的结论，而非目前仅能提供的单张遥感影像。模式单一导致服务附加值低，服务止步于“何种目标”的数据交付，用户无法获得正确知识，也就抑制了潜在需求的释放。

四是标准体系缺失。“通导遥”一体化涉及多类型数据、多协议传输、多等级服务质量，而目前并无统一的数据接口标准、服务质量分级标准、安全传输规范。这就导致“通导遥”卫星系统之间难以互联互通，缺乏实际操作层面的规范支撑，较多存在重复建设的情况。

五是商业模式滞后。时空信息服务高度依赖公共管理项目采购，而市场化收入占比偏低；电力巡检等少数领域虽探索出按服务收费的模式，但并未进行规模化应用与推广。可持续商业模式的短板导致“何种决策”等高价值服务缺乏可持续的价值实现机制，社会资本进入意愿低、产业规模扩张受限，最终影响“需要的人”以合理成本获取正确知识。

（二）商业航天背景下空天时空智能的发展机遇

空天时空智能理论的落地应用，离不开大规模卫星星座提供的物理支撑与工程验证平台，而商业航天的快速发展催生了亟需的核心载体与产业基

础。商业航天对空天时空智能的支撑作用主要体现在两方面。① 基础设施的逐步完善为数据的持续供给提供保障。批量化卫星制造、标准化总装测试等商业航天技术，推动PNTRC天基信息实时服务系统节点部署成本及周期的显著降低，使全球覆盖、超高重访率的时空感知网络建设变得可行。商业星座高频次、全天候的数据流，将为空天时空智能算法的训练与优化提供持续、稳定、高质量的多源时空数据来源，确立空天时空智能产业化的数据要素基础。② 能够提供支撑敏捷开发、快速验证的卫星平台。商业卫星从方案设计到在轨应用的全流程周期持续缩短，相应的快速迭代机制与真实在轨环境为星地协同感知、数据传输、智能处理等技术提供加速成熟的条件，推动相关技术体系从实验室研究转向工程化应用。

空天时空智能对商业航天的赋能作用主要体现在驱动产业从数据供给走向决策交付。空天时空智能的核心维度是感知实时化、认知智能化、服务精准化，构成商业航天产业升级的理论内核之一。在感知层面，多载荷协同处理光学、SAR、北斗反射信号等多元数据，支持形成立体感知能力，进而衍生出商业航天高质量应用。在认知层面，空天时空智能依托模型轻量化、边缘计算算法、深度学习算法、空间信息大模型，提高从原始时空数据向行业知识的自动化解译、智能化分析、精准化输出能力，引导商业航天产业进入“快准灵”的新发展阶段。在服务层面，商业航天的商业价值和应用效能发挥依赖响应时效，尤其是在应急救援、灾害监测、交通管控等场景中，依托星上实时处理可在捕获突发事件后直接发出告警并提供初步分析结果；将遥感解译封装为标准接口，推动“感知即决策”的服务闭环，拓宽商业航天的应用场景与价值边界，促进时空信息服务的实时化发展。

四、空天时空智能五维增强架构

（一）总体架构

本研究把握商业航天发展背景，以架构设计为核心要点并将技术约束作为既定边界，提出了由感知增强层、认知增强层、服务增强层、系统集成层、价值共创层构成的空天时空智能五维增强架构（见图1）。其中，感知增强层负责多源数据的在轨获取与筛选；认知增强层位于感知增强层之上，实施多源异构数据处理与知识融合；服务增强层将知识转化为面向用户的决策输出；系统集成层贯穿以上三层，提供“通导遥”资源的统一调度能力；价值共创层位于顶层，连接管理部门、企业、高校、用户等多元主体，形成生态协同机制。

五个层级之间形成双向闭环反馈，即下层为上层提供数据基底与能力支撑，上层向下层反馈应用需求与优化指令，由此实现层级之间的动态协同，显现出内在递进与逻辑耦合关系。感知增强是体系

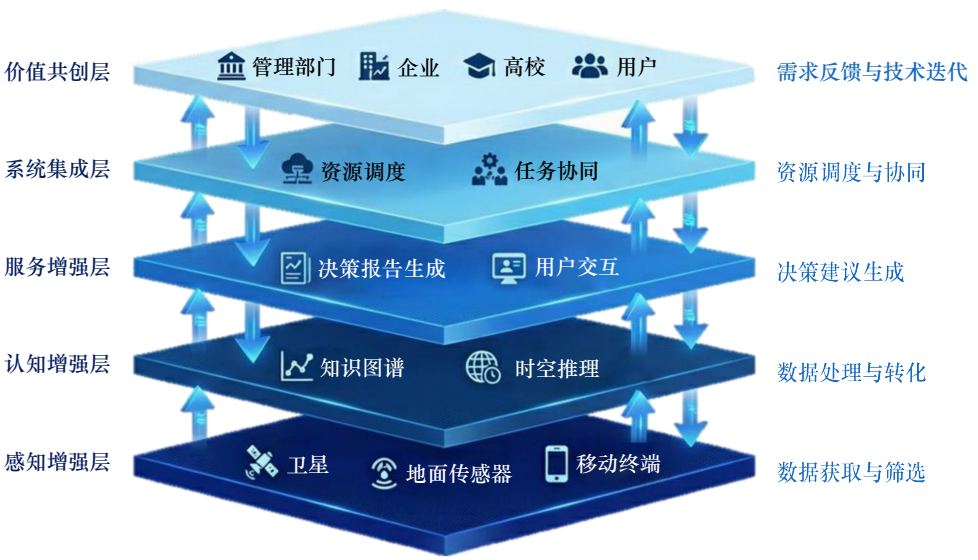

图1　空天时空智能五维增强架构

基础，压缩卫星至用户的信息传输链路，为后续的认知和服务环节提供实时可靠的数据保障。认知增强是体系核心，将多源异构数据在语义层面融合为知识，以支撑智能化决策而非单纯的信息呈现。服务增强是体系目标，最终价值体现为向用户输出决策结论而非原始数据与中间信息。系统集成是体系载体，整合“通导遥”一体化资源并作为感知、认知、服务增强的物理基础。价值共创是体系生态保障，倡导多元主体协同参与，确保所提架构在商业航天产业中的可持续迭代和长效演进。

在实施时，面向商业航天的空天时空智能五维增强可以分步有序推进：感知增强层、系统集成层的技术成熟度较高，可优先部署；认知增强层、服务增强层需要行业知识的深度介入，可在典型场景中先行先试；价值共创层贯穿始终，可在架构设计时考量开放接口并培育生态。整体上，通过系统重构感知、认知、服务、集成、价值共创五个环节的运作方式，推动面向商业航天的时空信息服务能力从PNT向PNTRC跃迁；五维增强架构可在短期内释放系统效能收益，也为后续的技术攻关方向与工程应用的路径部署提供顶层牵引。

（二）感知增强：从全量下传到在轨智能筛选

在传统的商业航天数据服务中，卫星将所有观测数据全量下传至地面，由地面系统完成全部处理，优点是地面算力充足，缺点是数据传输量大且处理延迟高。感知增强机制的核心是将部分处理任务前置到卫星，仅下传用户关注的信息或经过压缩的特征数据，从而缩短从数据获取到信息提取的链路。

相关机制的理论基础是边缘计算，即将计算推向数据源头。在空天时空智能场景中，卫星是位于最边缘的节点，星上处理并非执行全部复杂算法，而是承担两类任务：数据筛选，包括云检测、目标检测、变化检测等，以剔除无效或冗余数据，仅保留有价值的信息；特征提取，如从高光谱影像中提取植被指数、从SAR影像中提取变化区域。“珞珈三号”01星的应用结果表明，星上云检测和目标追踪模块可将下传数据量压缩至不足原来的1/10[45]。

鉴于星上算力有限的现实约束，感知增强可采用分级策略。当前阶段以“星上粗筛+地面精处理”为主要模式：星上负责快速判断是否存在异常或感兴趣目标，地面负责精细分类、定量反演、复杂场景理解。随着星载AI芯片性能的提升，星上处理的深度将逐步增加，未来有望实现典型目标的在轨识别与定位。

（三）认知增强：从多源异构到知识融合

感知增强可以解决信息获取的时效问题，但多源数据之间仍存在语义鸿沟，如光学影像、雷达影像、导航信号、地面传感器数据格式各异、时空基准不同、语义层次不统一。应用认知增强机制跨越这一鸿沟，将分散的数据转化为支持推理和决策的知识。

知识图谱是实现上述目标的核心技术。构建时空知识图谱，将道路、建筑物、植被等地理实体，火灾、洪水、交通拥堵等事件，空间邻近、因果关联等关系以图结构组织起来，实现跨源数据的语义对齐。例如，光学影像识别出的高温异常点、雷达影像检测出的地表形变区域，在知识图谱关联后即可共同指向地质灾害前兆等更高层次的认知结论[50]。武汉市“交警数据大脑”系统的应用结果表明，将北斗定位轨迹、视频监控图像、地磁感应数据、互联网信息在认知层面融合后，事故处置时间从7 min缩短至1.5 min[5,50]，显现出商业航天产业将多源异构数据整合为高效决策支持的认知增强价值。

认知增强同样需要考虑技术能力的约束。在数据稀疏区域，知识图谱的覆盖有所不足，可采用迁移学习或时空插值进行补充。对于无法自动对齐的异构数据，可先设计并应用人机协同的标注与校验机制，再由专家介入关键节点。

（四）服务增强：从数据销售到决策输出

针对数据产品与决策应用的结构性断裂特性，服务增强机制通过服务化封装与接口标准化，实现从数据交付向决策输出的转变，直接回应用户的业务决策需求。其中，空天时空智能遵循的基本原则[17]是服务增强的理论基础。

将数据转化为决策，需要三个层面的支撑：用户需求建模，不同行业的决策逻辑差异明显，需要将行业知识转化为可计算的服务参数；自动化决策流程，将认知层输出的态势理解映射为具体的建议方案，再按照用户约定的格式进行输出；信任机制，用户需要知悉决策结论的可信度，系统应提供

置信区间和可解释性依据。在复杂场景中，可采用人机协同策略，即系统输出初步建议、专家确认关键判断。随着数据积累和模型迭代，相关处理的自动化程度将逐步提高。

相关转变的理论基础是服务主导逻辑，即价值的载体不是产品本身，而是产品提供的服务。面对农业保险场景，保险公司需要的不是受灾区域的单幅影像，而是包含受灾面积、减产比例、建议赔付金额的专业报告。面对应急场景，指挥员需要的不是火点坐标，而是火势蔓延方向与速度判断、疏散路线建议。

（五）系统集成：从单星单能到“通导遥”一体化

构建系统集成机制，将“通导遥”功能先从各自独立的系统中抽取出来，再整合为统一调度的资源池，实现“通导遥”一体化能力。打破传统的商业航天模式，在物理层面实现载荷共星或星间互联，在软件层面实现任务协同和资源动态调度。软件定义卫星技术是可行的路径之一，卫星的功能可在轨重构并根据任务需求动态分配“通导遥”资源。

在星间激光链路尚未大规模部署的现实约束下，系统集成可考虑采用过渡方案。近期由地面中继站完成星座之间的数据交换，远期在星间链路技术成熟后升级为星座自主组网。“珞珈二号”01 星的通信导航一体化实验表明，在同一平台上集成通信、遥感功能具有技术可行性，导航增强信号、SAR 成像能够协同工作而互不干扰。

衡量系统集成效能的主要指标是时间、空间维度的资源效率。重构时间反映系统从接收任务请求到完成资源调度的应变速度，决定多任务并发场景下的切换成本；响应时间描述从任务需求发布到有效数据获取的全链路时效，直接关联系统的实时服务能力；资源利用率刻画卫星闲置时间的比例，从运营层面揭示系统部署的经济性与可持续性；三方面的综合优化是系统集成从静态部署走向动态调度的关键标志。

（六）价值共创：从链式供给到生态协同

价值共创机制主要解决“如何让服务可持续”的生态问题，关键在于构建管理部门、企业、高校、用户多方协同且共生共赢的产业生态。

管理部门的作用是提供初始需求、发布政策引导，如设立示范区、采购“决策即服务”。企业开展技术转化和商业运营，构建开放平台以降低开发门槛、吸引第三方开发者。高校承担基础研究和人才培养职责。用户尤其是行业用户提供真实场景和应用反馈，驱动技术迭代和演进。电力走廊无人机巡检系统的实践表明，当电网公司将巡检需求开放给多家无人机服务商后，技术迭代速度明显加快、综合成本稳步下降。

价值共创机制是对技术约束的有效回应，以开放平台和应用程序接口的方式，让数量众多的中小开发者参与“长尾”应用的开发，有效缓解大企业在垂直细分领域投入不足的问题。生态化的组织方式主要通过制度设计来激发群体活力，并不依赖单项技术突破。

五、空天时空智能五维增强架构的规模化应用潜力

（一）实践案例分析

直接对应感知增强的是“珞珈三号”01 星，作为国内首颗具有民用星上智能处理功能的遥感卫星，实现云检测、目标追踪、智能筛选等算法模块的在轨部署，驱动遥感数据由全量下传向星上筛选、价值信息回传的范式转变。“珞珈三号”01 星同时验证了遥感信息从获取至终端的分钟级快传能力，为服务增强层提供了时效需求支撑。相关实践表明，感知增强机制得到了工程验证，星上处理技术具有可行性。

集中体现认知增强、服务增强协同价值的是武汉市“交警数据大脑”系统，融合应用了北斗定位轨迹、视频监控、地磁检测、互联网众包等多源异构的时空数据，构建了全域态势感知和智能调度模型，显著提升了交通事故的平均处置效率。武汉市“交警数据大脑”系统根据多源数据语义融合和实时挖掘生成调度方案，执行从数据到信息、从信息到决策的闭环输出，验证了认知层融合对空天时空智能应用决策效率与响应能力的提升作用。

体现系统集成、价值共创协同的是电力走廊无人机巡检系统。在系统集成层面，贯通了无人机平台、地面站、数据中心与电网调度单元之间的接口与业务流程，支持多厂商设备的即插即用接入，贯通了从“任务下发 – 自主巡检 – 数据回传 – AI 诊

断 – 缺陷分发 – 处置闭环”完整流程。在价值共创层面，形成了设备制造商、运营服务商与电网用户之间共建共享的产业生态：电网企业开放真实应用场景并提供业务需求，设备制造商提供标准化硬件与接口，运营服务商承担数据采集与初步分析，各方共享数据价值与收益。相关实践为系统集成层与价值共创层的规模化落地提供了可复制、可推广的工程样本。

“吉林一号”与北斗短报文的联动系统，展示了通信导航融合在应急领域的应用价值。依托卫星在轨智能火点检测、北斗短报文直传通道，开展火情自动识别、坐标解算、秒级预警推送，直接跳过常规的地面接收与人工判读环节，显现出感知增强（星上在轨检测）、系统集成（“通导遥”协同）的技术可行性。通过星上智能处理、导航链路、通信链路的结合应用，获得了不依赖地面站的应急预警技术成效。

四个案例分别对应空天时空智能五维增强架构中的细分维度，体系中的每个核心维度至少由1个实践案例提供了工程支撑与价值验证。这表明，空天时空智能五维增强架构并不是脱离工程实践的理论构想，而是对现有“通导遥”一体化成功经验的系统性梳理与提炼。值得注意的是，现有案例均未能实现对体系中五个维度的全面覆盖，说明工程实践仍处于局部突破、单点优化的发展阶段，因而构建整合性架构来指导未来的系统设计、推动各维度能力协同提升具有鲜明的现实需求。

（二）典型场景应用分析

1. 场景选取

从覆盖范围的角度出发，选取了全球、区域、城市、个人四个具有递进关系的典型场景。相关场景在空间范围、时效要求、技术依赖、服务模式上具有显著的差异性，能够较为全面地检验空天时空智能五维增强架构的适用性。其中，全球尺度场景以“双碳”管控与碳汇核算为代表，需要卫星全球连续覆盖和长时间序列的数据；区域尺度场景以农业保险精准定损为代表，提出针对特定农业区的中等尺度和周期性监测需求；城市尺度场景以智慧城市精细化管理为代表，涉及高密度人口区域的实时、多源、多主体协同信息；终端尺度场景以个人移动终端的无缝定位与应急救援为代表，需要室内外一体化的高精度定位和应急通信能力。

2. 场景分析

（1）全球尺度上的“双碳”管控与碳汇核算

传统的森林碳汇核算方法依赖样地调查和统计模型。样地调查周期长、成本高，通常每5年更新1次，难以捕捉森林的动态变化。遥感数据虽然可以提供大范围覆盖，但传统模式下需要用户自行下载影像并进行处理和反演，流程繁琐且不同应用场景下通用性不佳。

在空天时空智能五维增强架构下，相关服务流程可重构为：在感知增强层，低轨卫星星座对全球森林区域进行高频次观测，星载激光雷达、光学传感器在轨提取树高、冠幅等参数，仅下传反演后的特征数据（而非原始点云）；在认知增强层，地面系统将多时相特征数据输入碳汇模型，结合气象、土壤等辅助数据，自动计算区域碳储量变化；在服务增强层，直接输出森林碳汇报告，包括不同林型的碳储量、变化趋势、不确定性区间，以标准化格式推送给碳交易市场和管理部门；在系统集成层，保障卫星任务调度与数据下传的协同；在价值共创层，连接林业部门、碳交易所、第三方核查机构，形成可审计的数据链条。

与传统模式相比，碳汇核算周期将从年级压缩至季度级甚至月级，数据获取所需的人工干预大幅减少，核算结果的时空分辨率显著提升。在涉及的具体技术能力方面，星载激光雷达森林调查已有成熟应用，低轨星座组网正在推进，碳汇反演模型相对成熟。

（2）区域尺度上的农业保险精准定损

农业保险定损的传统流程是在农户报案后，保险公司派人现场勘察、拍摄照片、评估损失并确定赔付金额，在灾害大面积发生时面临人力不足、勘察周期长、主观判断差异大的问题。遥感技术虽可辅助应用，但保险公司需要自行购买影像、聘请解译人员，综合成本居高不下且时效性不佳。

在空天时空智能五维增强架构下，相关服务流程可重构为：在感知增强层，区域农业监测星座在作物生长季内以天为周期重访，星上识别云覆盖并自动调整观测计划，确保关键物候期内具有高质量影像；在认知增强层，将多时相影像与地块边界、作物类型、历史产量数据融合，采用时序分析识别受灾区域并估算减产比例；在服务增强层，输出定

损报告，逐地块标注受灾面积、减产等级、建议赔付金额，通过移动端应用直接推送给保险公司和农户；在系统集成层，确保北斗定位信息与地块边界的高精度匹配；在价值共创层，连接保险公司、农业管理部门、气象部门，实施灾情信息自动核验。

与传统模式相比，定损时间从天级压缩至小时级，人力成本大幅降低，定损结果的一致性和可追溯性显著提高。在涉及的具体技术能力方面，时序遥感变化检测技术成熟，高精度地块边界在平原农区已有较好覆盖，多云雨地区的影像获取仍有难度，可通过雷达卫星补充解决。

（3）城市尺度上的智慧城市精细化管理

城市管理涉及交通维护、公共安全、环境监测等方面。在传统模式中，各类部门独立建设感知系统，导致数据共享难度大、应急响应时信息传递链条长。

在空天时空智能五维增强架构下，相关服务流程可重构为：在感知增强层，部署于城市的路侧单元、移动终端、无人机构成泛在感知网络，由北斗高精度定位提供统一的时空基准；在认知增强层，“城市大脑”汇聚交通流量、人群密度、空气质量、事件报告等多源数据，应用时空知识图谱来识别异常模式并预测演变趋势；在服务增强层，向不同用户输出差异化的决策建议，如对交管部门输出信号配时优化方案和拥堵疏导路径，对应急部门输出事件响应方案和资源调度建议，对社会公众输出出行建议和安全预警；在系统集成层，保障感知设备、通信网络、计算资源的统一调度；在价值共创层，鼓励第三方开发者基于开放数据开发垂直应用，参与构建城市服务生态。

与传统模式相比，跨部门协同的响应时间从分钟级压缩至秒级，城市管理从被动响应转向预测预警。在涉及的具体技术能力方面，北斗高精度定位、5G、视频智能分析已有规模化部署，跨部门数据共享机制仍是短板。

（4）终端尺度上的个人移动终端精确定位与应急救援

基于个人移动终端的定位服务在日常生活中已经普及，但在室内、地下、隧道等GNSS信号盲区精度急剧下降甚至失效。在野外无地面网络覆盖的区域，用户也无法通过个人移动终端发送求救信息。传统的解决方案是部署专用室内定位基站、购买卫星通信终端，成本高且难以普及。

在空天时空智能五维增强架构下，相关服务流程可重构为：在感知增强层，个人移动终端集成包括北斗信号、音频定位、5G多波束、惯性测量单元在内的多源定位能力，在检测到GNSS信号衰减时自动切换至音频定位或5G定位模式，与惯性数据融合支持连续导航；在认知增强层，个人移动终端根据环境特征自动识别室内外场景、运动模式并选择合适的定位策略；在服务增强层，个人移动终端输出位置和情境的复合信息（如您已进入地下二层停车场、最近空车位在右侧30 m处），当用户触发紧急呼叫时，无需地面网络即可通过北斗短报文将位置信息和求救信号发送至应急中心；在系统集成层，保障个人移动终端与卫星、地面基站的协同；在价值共创层，将定位能力开放给第三方应用开发者，发展老人监护、儿童手表、物流追踪等垂直应用。

与传统模式相比，室内定位精度从米级提升至亚米级，室内外切换成功率提升至90%以上，应急求救从依赖地面网络变为星地融合。在涉及的具体技术能力方面，音频定位、5G定位在实验室和特定场景下获得验证，北斗短报文功能已集成至消费级个人移动终端，多源融合算法的功耗优化、终端厂商的适配推广仍有不足。

3. 场景分析结果

四个典型场景的应用分析表明，面对不同尺度、不同时效的要求，空天时空智能五维增强架构均能提供优于传统模式的服务方案：对于全球尺度强调感知与认知的协同，对于区域尺度强调服务增强的行业适配，对于城市尺度强调系统集成与价值共创的融合，对于终端尺度强调感知增强与系统集成的终端落地。该架构的应用优势集中体现为：响应时效显著优化，业务处置可压缩至分钟级甚至秒级；服务模式由数据交付演进至决策输出，大幅缩减任务耗时；信息壁垒被有效破除，支持多方主体协同联动。

（三）商业可行性分析

空天时空智能五维增强架构各层的核心产出不尽相同：感知层提供原始数据与特征信息的实时获取能力，认知层输出结构化知识与推理结果，服务层生成直接用于决策的报告与建议，集成层交付可

调用的平台接口与系统协同能力，价值共创层形成多方协作的机制与规则框架。向用户交付价值的方式也存在差异，衍生出四种梯度化的商业模式，即“数据即服务”“平台即服务”“决策即服务”“能力共建”。其中，“数据即服务”模式以销售遥感数据、定位数据为主，依赖感知增强能力，是当前技术最成熟、市场规模最大的商业模式。“平台即服务”模式开放星上处理能力、数据分析接口，按调用量收费，依赖感知增强和系统集成的协同，正在逐步兴起。“决策即服务”模式以输出决策报告或解决方案为核心，按服务成果收费，依赖认知增强和服务增强，属于高附加值的新兴商业模式。“能力共建”模式通过与管理部门、龙头企业合作建设区域服务平台，收取建设费与运营服务费，依赖价值共创机制，是获得电力巡检等领域实践验证的商业模式。四种商业模式并非相互替代，而是构成面向不同客户群体的分层供给体系，如管理部门和大型企业适配“能力共建”模式，中小企业和开发者适配“平台即服务”模式，终端用户适配“决策即服务”或“数据即服务”模式，由此实现不同需求的精准对接。

客观来看，推动空天时空智能五维增强架构从技术方案走向商业运营，还面临市场接受度、用户信任、政策壁垒、数据安全合规、初期投入等方面的现实障碍，需要采取科学合理的规避措施。在市场端，用户长期习惯购买影像自行处理，也因标准缺失而致潜在的切换成本较高，需要依托公共采购来示范“决策即服务”，制定统一接口与分级标准，提供免费试用和按效果付费等灵活计价方式。在用户信任方面，对涉及财产赔付、公共安全的自动化决策结果存疑不可避免，需要构建人机协同机制，在关键环节保留人工复核，输出附带置信度、溯源证据链的可解释性信息，逐步建立信任。在政策壁垒方面，遥感商业化受到频率审批、跨境数据流动的约束，需要协调监管部门并组建专业合规团队，针对海外市场采取本地合资、数据本地化存储方式，优先在政策开放地区试点以缓释风险。在数据安全合规方面，时空轨迹、用户定位数据属于个人敏感信息，高精度遥感测绘成果可能涉及国家重要地理信息，需要实施分类分级保护，落实去标识化、差分隐私和用户授权，确保敏感数据由资质图商脱敏后流通；同时在价值共创层引入第三方审计并由数据共享协议约定最小必要原则，确保跨主体数据流通的合规性。在初期投入方面，卫星星座和地面系统建设资金需求大，应采用分阶段建设方式，依托现有能力快速验证商业模式闭环并以运营收入扩充后续投资；同时争取新基建专项基金、产业引导基金等政策性金融支持，合理缓解早期投资压力。

六、空天时空智能五维增强架构规模化应用的措施建议

（一）系统集成优化

系统壁垒是制约空天时空智能效能提升的首要瓶颈。“通导遥”卫星分属不同主体建设和运维，数据格式、传输协议、服务接口标准互不兼容，亟需从技术、体制、工程层面统筹并推动突破。技术层面，加快星上“通导遥”一体化载荷的标准化设计，可组织卫星总体、载荷研制、算法开发等单位共同制定“通导遥”一体化的卫星平台与载荷接口标准，明确“通导遥”功能在星上的资源分配原则和协同工作模式。在体制层面，逐步打破管理部门“通导遥”割裂式管理，加快建立跨部门的协调机制。在工程层面，以“东方慧眼”星座建设为契机，在后续卫星系统中全面部署“通导遥”一体化功能。

（二）服务流程再造

服务链路冗长的根源在于星地分工不合理，如传统模式中卫星只负责采集和转发，而全部处理依赖地面。空天时空智能五维增强架构下的“星上粗筛+地面精处理”分级策略需要及时转化为标准化的服务流程。建议国家遥感中心牵头制定星地协同服务流程规范，明确星上处理结果输出格式，支持不同卫星的数据被地面系统统一接收和处理。在基础设施建设方面，可依托现有的国家民用空间基础设施地面站网并注重规划统筹，确保全国主要区域的分钟级响应覆盖。针对应急任务需求，建立专门的快速处理通道，支持预警信息的毫秒级推送。

（三）服务模式创新

服务模式单一表现为产业以销售数据为主、未能充分释放决策价值，突破这一瓶颈需要供给侧、

需求侧的共同行动。建议行业管理部门实施供给侧引导，在公共采购中优先应用“决策即服务”模式，加快形成示范效应并带动商业采购跟进。在需求侧，培育用户对自动化决策的信任度，开发标准化的决策产品并以用户熟悉的格式和流程交付。在技术层面，加强自动化决策结果的可解释性研究，在决策报告中附带置信区间、主要依据、不确定性来源等信息，便于用户评估决策结论的可靠性，支持用户在理解依据的基础上接受决策结论。

（四）标准体系建设

标准缺失是系统孤立、服务链路冗长的深层原因，数据接口、服务质量分级、安全与隐私等标准成为产业发展亟需。加快制定星上智能处理数据接口规范，统一星上处理结果的格式、元数据字段、传输协议。可参照通信领域的服务质量等级划分方法，制定空天时空智能服务的质量分级标准。提出空天时空智能服务的定位精度、响应延迟、数据更新频率等指标，明确传输加密要求，制定商业遥感数据的脱敏规范，建立敏感信息及自动模糊化的技术标准。

（五）商业模式多元化

商业模式滞后制约社会资本进入，不利于产业规模扩张，可行的路径是管理部门引导和市场驱动并行。在管理部门引导方面，建议设立时空智能场景创新基金，为入选企业提供数据、算力、种子资金支持，加速技术从实验室研究走向市场化应用。在市场驱动方面，论证和建设时空智能开放能力平台，合理降低技术和应用开发门槛，吸引中小企业和创业团队进入垂直细分领域，培训并形成“长尾”市场。同时注重国际化发展，以“一带一路”共建国家为应用重心，输出“通导遥”一体化服务和标准。

（六）人才培养机制改革

人才结构错配是产业发展长期性的制约因素。发展面向商业航天的空天时空智能，需要具有测绘遥感、航天工程、AI、经济管理等学科知识的复合型人才。建议教育管理部门支持有条件的高校增设时空智能与“通导遥”一体化交叉学科方向，鼓励采用校企联合模式开展时空智能卓越工程师培训项目。建议设立青年学者奖项，择优提供科研项目支持和学术交流机会，加速领域人才成长。

七、结语

本文立足商业航天发展背景和机遇，以架构设计为核心切入点，提出了空天时空智能五维增强架构，通过感知增强、认知增强、服务增强、系统集成、价值共创五个层面的协同设计，为分散的单项技术提供了系统级的整合框架，推动时空信息服务从 PNT 向 PNTRC 的技术跃迁。该架构的核心创新在于，不依赖单项技术的颠覆性突破，而是通过系统层级的结构重组释放协同效能，使“通导遥”卫星系统从分立运行走向一体化服务。在验证层面，通过“珞珈三号”等工程实践、全球碳汇等典型场景的应用推演，显现了所提架构中不同维度的技术可信性以及在不同尺度下的适用性。空天时空智能五维增强架构并非对未来技术的超前构想，而是对已有成功经验的系统性提炼。在产业层面，该架构衍生出“数据即服务”“平台即服务”“决策即服务”“能力共建”四种梯度化的商业模式，支持形成从低门槛数据交付到高附加值决策输出的分层价值实现路径。

从更深层次看，顶层架构设计并非当前技术攻关完成之后的附加性工作，而是牵引未来技术方向、释放系统效能、定义商业模式的先决条件。空天时空智能五维增强架构回应了商业航天发展中“如何将已有工程积累转化为可持续商业价值”这一根本性命题，为商业航天产业布局优化、国家新兴产业发展提供了理论支持与实践参考。面向未来，随着星间激光链路、在轨 AI 芯片等关键技术的持续突破，空天时空智能五维增强框架将在更广泛的场景中落地应用。当然，从技术验证迈向规模化部署，需要政策制度、跨学科知识的协同支撑，推动构建“感知 – 认知 – 决策”闭环的智能系统，为全球时空智能治理提供中国方案。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 15, 2026; **Revised date:** May 25, 2026

Corresponding author: Li Deren is a professor from the State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, and a menber of Chinese Academy of Sciences, a

menber of Chinese Academy of Engineering. His major research feilds include geospatial information science, spatiotemporal intelligence. E-mail: drli@whu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research of Key Technologies and Industrial Planning of Commercial Aerospace of Guangdong Province” (2025-DFZD-26); National Key Research and Development Program of China (2023YFB3906102)

参考文献

[1] 国家航天局推进商业航天高质量安全发展行动计划(2025—2027年)[EB/OL]. (2025-11-15)[2026-05-15]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10719382/content.html.
Action plan of the China National Space Administration to promote high-quality and safe development of commercial space (2025—2027)[EB/OL]. (2025-11-15)[2026-05-15]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10719382/content.html.

[2] Stern A. Commercial space flight is a game-changer[J]. Nature, 2012,484(7395):417.

[3] 李德仁,王密,申文斌,等. 论人工智能时代的测绘学发展[J]. 测绘学报,2025,54(12):2107-2115.
Li D R,Wang M,Shen W B,et al. On the development of surveying and mapping in the era of artificial intelligence[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2025,54(12):2107-2115.

[4] 马万卓,钟兴,董科研,等. 我国商业航天信息产业发展研究[J]. 中国工程科学,2024,26(5):156-165.
Ma W Z,Zhong X,Dong K Y,et al. Development of commercial aerospace information industry in China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng,2024,26(5):156-165.

[5] 李德仁,郭昊南. 时空智能助推新质生产力发展[J]. 科技导报,2025,43(24):27-34.
Li D R,Guo H N. Spatio-temporal intelligence boosts the development of new quality productive forces[J]. Science and Technology Review,2025,43(24):27-34.

[6] 李德仁,王密,肖晶,等. 论无所不在的时空智能[J]. 遥感学报,2025,29(6):1388-1398.
Li D R,Wang M,Xiao J,et al. On ubiquitous spatio-temporal intelligence[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(6):1388-1398.

[7] 李德仁. 从珞珈系列卫星到东方慧眼星座[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1557-1565.
Li D R. From the Luojia series satellites to the oriental smart eye constellation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2023,48(10):1557-1565.

[8] Zhang C,Shi S Z,Yan S H,et al. Moving target detection and parameter estimation using BeiDou GEO satellites-based passive radar with short-time integration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2023,16:3959-3972.

[9] Liu X,Ji S,Sun M M,et al. On-orbit image processing technology for intelligent remote sensing satellites:Progress,challenges, and opportunities[J]. Aerospace Science and Technology, 2026, 174:111859.

[10] Shi X M,Qi H,Shen Y M,et al. A spatial–temporal attention approach for traffic prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2021,22(8):4909-4918.

[11] Huang K L,Shi B T,Li X,et al. Multi-modal sensor fusion for auto driving perception:A survey[PP/OL]. V3. arXiv (2024-12-16)[2026-05-15]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02703.

[12] Ni B R,Wang X S. Geographic research in the AI era:Applications,methods,and prospects[J]. Geographical Research Bulletin,2024,3:103-124.

[13] Li D R,Wang M,Guo H N,et al. On China’s earth observation system:Mission,vision and application[J]. Geo-spatial Information Science,2025,28(2):303-321.

[14] Li D R,Wang M,Li X. Towards spatio-temporal intelligence:From earth observation to digital twin[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,188:125-138.

[15] Feng L,Li D R. Can satellites and AI reveal the Maxwell equations of the earth?[J]. National Science Review, 2026, 13(8):nwag210.

[16] Song W X,Jiang S J,Camps-Valls G,et al. Towards data-driven discovery of governing equations in geosciences[J]. Communications Earth & Environment,2024,5:589.

[17] 李德仁,王密,杨博,等. 时空智能学[M]. 北京:科学出版社,2025:134.
Li D R,Wang M,Yang B,et al. Spatio-temporal intelligence[M]. Beijing:Science Press,2025:134.

[18] Li W W,Yang Q W,Du X D,et al. LEO augmented precise point positioning using real observations from two CENTISPACE^{TM} experimental satellites[J]. GPS Solutions,2023,28(1):44.

[19] Gong X P,Guo R X,Lv M J,et al. Rapid centimeter-level positioning based on BeiDou-3 global short message communication[J]. Measurement Science and Technology,2025,36(4):046317.

[20] Van Cleemput E,Adler P B,Suding K N,et al. Scaling-up ecological understanding with remote sensing and causal inference[J]. Trends in Ecology & Evolution,2025,40(2):122-135.

[21] Luba O,Boyd L,Gower A,et al. GPS III system operations concepts[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005,20(1):10-18.

[22] Grayver E,Nelson R,McDonald E,et al. Position and navigation using starlink[C]//2024 IEEE Aerospace Conference,2024:1-12.

[23] Neinavaie M,Shadram Z,Kozhaya S,et al. First results of differential Doppler positioning with unknown starlink satellite signals [C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO),2022:1-14.

[24] Stock W,Schwarz R T,Hofmann C A,et al. Survey on opportunistic PNT with signals from LEO communication satellites[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2025,27(1):77-107.

[25] Fernandez-Hernandez I,Chamorro-Moreno A,Cancela-Diaz S,et al. Galileo high accuracy service:Initial definition and performance[J]. GPS Solutions,2022,26(3):65.

[26] Galan-Figueras A,Fernandez-Hernandez I,Seco-Granados G,et al. Analysis of the Galileo SAR return link service using the GalileoSARlib open-source library[J]. Engineering Proceedings,2026, 126(1):13.

[27] Ansari K. Investigation of the standalone and combined performance of IRNSS and QZSS constellations over the Asia–Pacific Region[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 130(4):2887-2901.

[28] Suzuki T. Evaluation of L6 augmentation signal reception charac-

teristics and positioning accuracy of compact and lightweight GNSS antennas[J]. Scientific Reports，2023，13(1)：21766.

[29] 邵振峰，程涛，李德仁，等. 空地协同移动智能服务平台研发及典型应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2023，48(5)：749-755.
Shao Z F，Cheng T，Li D R，et al. Development and applications of aerial-ground collaborative mobile intelligent service platform [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2023，48(5)：749-755.

[30] Thoelert S，Steigenberger P，Montenbruck O. GLONASS-K2 signal analysis[J]. GPS Solutions，2024，28(3)：141.

[31] Dey A，Iyer K，Xu B，et al. Performance evaluation of vectorized NavIC receiver using improved dual-frequency NavIC measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2023，72：8505213.

[32] Hou T，Li A. Performance analysis of NOMA-RIS aided integrated navigation and communication (INAC) networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2023，72(10)：13255-13268.

[33] Sheng M，Guo C T，Huang L. Integrated communication，navigation，and remote sensing in Leo networks with vehicular applications[J]. IEEE Wireless Communications，2025，32(3)：140-147.

[34] Zhang Y C，Soualle F，Keskin M F，et al. Distributed integrated sensing，localization，and communications over LEO satellite constellations[PP/OL]. arXiv[2026-05-15]. https://arXiv.org/pdf/2508.11029v2.

[35] Lu Z，Lu X T，Cai Z T，et al. Development demands for remote sensing information processing technology：Inspired by the US PWSA [C]//IET International Radar Conference (IRC 2023)，2023：3880-3883.

[36] Wang M Y，Nardin A，Ma R F，et al. Integrated communication and navigation based on LEO satellite networks：A survey [J]. IEEE Internet of Things Journal，2025，12(22)：46244-46268.

[37] 江旭东，陈潇，马满帅，等. 典型低轨卫星星座导航增强性能对比性评估研究[J]. 全球定位系统，2021，46(2)：49-55.
Jiang X D，Chen X，Ma M S，et al. Comparative evaluation of navigation enhancement performance of typical LEO satellite systems[J]. GNSS World of China，2021，46(2)：49-55.

[38] Han C，Niu X L，Jing C. A novel imaging algorithm with high range resolution based on Beidou signal-based passive SAR[C]// 2022 IEEE International Conference on Signal Processing，Communications and Computing (ICSPCC)，2022：1-5.

[39] Tang C P，Hu X G，Chen J P，et al. Orbit determination，clock estimation and performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b service [J]. Journal of Geodesy，2022，96(9)：60.

[40] 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)：551-570.
Wang J Y，Yan J，Wu J Q，et al. AI technology empowers in-orbit processing of remote sensing satellite data[J]. Journal of Geomatics Science and Technology，2024，40(6)：551-570.

[41] 王峰，李建强，杨东凯，等. “吉林一号”宽幅01B卫星GNSS-R数据风速反演研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024，49(1)：56-67.
Wang F，Li J Q，Yang D K，et al. Wind speed retrieval using GNSS-R data from “Jilin-1” kuanfu-01B satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2024，49(1)：56-67.

[42] 张双成，王铭辉，杨娜，等. 国产航天宏图一号SAR卫星数据干涉测量重建DEM精度验证与分析[J]. 遥感学报，2025，29(5)：1290-1304.
Zhang S C，Wang M H，Yang N，et al. SAR satellite data from domestic PIESAT-1 interferometric reconstruction：DEM accuracy verification and analysis[J]. National Remote Sensing Bulletin，2025，29(5)：1290-1304.

[43] Liu B H，Peng M G，Li J J，et al. Integrated communication and navigation enabled low earth orbit satellite systems[J]. IEEE Network，2025，39(5)：254-262.

[44] Zhu M T，Zhang G，Jing M Q，et al. SAR image super-resolution with integrated speckle suppression via generative adversarial network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing，2025，18：23879-23896.

[45] Wang M，Wu Q Y，Xiao J，et al. Luojia 3-01 satellite—Real-time intelligent service system for remote sensing science experiment satellite[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing，2024，17：8250-8257.

[46] Li D R，Wang M，Jiang J. China’s high-resolution optical remote sensing satellites and their mapping applications[J]. Geo-spatial Information Science，2021，24(1)：85-94.

[47] 董志鹏. 基于卷积神经网络的高分辨率遥感影像目标检测方法研究[J]. 测绘学报，2023，52(9)：1613.
Dong Z P. Research on object detection in high resolution remote sensing imagery based on convolutional neural networks[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2023，52(9)：1613.

[48] 王密，项韶，肖晶. 面向任务的高分辨率光学卫星遥感影像智能压缩方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(8)：1213-1219.
Wang M，Xiang S，Xiao J. Task-oriented intelligent compression method for high resolution optical satellite remote sensing image [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2022，47(8)：1213-1219.

[49] Han D R，Hu Y D，Zheng K，et al. A DRL-based handover strategy for ISL-enabled LEO mega-constellation networks under heterogeneous QoS demands[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2026，39(9)：103895.

[50] 王密，郭贝贝，皮英冬，等. 珞珈三号01星在轨处理技术及验证[J]. 测绘学报，2024，53(4)：599-609.
Wang M，Guo B B，Pi Y D，et al. On-orbit processing technology and verification of Luojia-3 01 satellite[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2024，53(4)：599-609.