

LI Yingyu, YANG Yuxuan, LIU Honglin, JIN Jin, ZHAO Tong, WANG Guangyu, YANG Zhen, MENG Xin. Task-driven Satellite Cluster Self-organization Method Based on Linear Groups in Finite Fields (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(6): 1552–1569. CSTR:32142.14.cjss.2024-0120. DOI:10.11728/cjss2025.06.2024-0120

基于有限域线性群的卫星集群能力与 认知模型构建及在轨验证*

李英玉^{1,2} 杨宇轩² 刘红林² 金 金²
赵 通³ 王广钰² 杨 震² 孟 新^{1,2}

1(中国科学院大学 北京 100049)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(北京大学计算机学院 北京 100871)

摘 要 提出一种基于有限域线性群的卫星集群能力与认知模型构建方法, 并基于该模型研究了能力视图、自主任务分配算法和发布订购机制, 进行在轨验证. 引入有限域与线性群的代数理论, 构建卫星智能体的能力模型, 为后续任务分配提供建模方法和逻辑依据, 基于能力与认知模型, 构建基于能力与认知模型的卫星集群能力视图, 为用户提供直观的能力显示和交互手段, 便于资源订购和管理; 设计基于能力与认知模型的卫星集群自主任务分配算法, 综合考虑智能体自身能力、邻居影响和任务驱动因素, 实现任务需求的自主匹配与决策, 确保卫星智能体能够合理分配卫星资源; 构建卫星集群发布订购机制, 实现卫星资源与用户需求的精准对接; 进行了卫星集群发布订购服务流程的在轨验证实验, 实现卫星资源能力构建、自主任务分配算法及能力视图发布订购服务流程, 星地即时能力订购响应时间(带天地链路通信时间)为 31s, 验证了能力及认知模型的可行性和有效性, 为其实际应用提供了依据.

关键词 能力视图, 卫星集群, 卫星智能体, 自主任务分配, 有限域线性群

中图分类号 V524

Task-driven Satellite Cluster Self-organization Method Based on Linear Groups in Finite Fields

LI Yingyu^{1,2} YANG Yuxuan² LIU Honglin² JIN Jin²
ZHAO Tong³ WANG Guangyu² YANG Zhen² MENG Xin^{1,2}

1(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

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

3(School of Computer Science, Peking University, Beijing 100871)

* 中国科学院重点部署项目资助 (CX2020-01-02-13)

2024-09-27 收到原稿, 2025-08-06 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract This paper proposes a method for constructing the capability and cognitive model of satellite constellations based on the linear group over a finite field. Based on this model, the capability view, autonomous mission assignment algorithm, and publish-subscribe mechanism are studied, and an on-orbit verification is conducted. Firstly, by introducing the algebraic theory of the finite field and the linear group, the capability model of satellite agents is constructed. The capabilities of satellites are mapped into matrices over the finite field, and the cognitive state vector is established to accurately describe the capability structure and cognitive state of satellite agents, providing a modeling method and logical basis for subsequent mission assignment. Secondly, based on the capability and cognitive model, the capability view of the satellite constellation is constructed. By organizing and processing the capability data, the capability view is designed to provide users with an intuitive display and interaction means of capabilities, facilitating resource subscription and management. Then, an autonomous mission assignment algorithm for satellite constellations based on the capability and cognitive model is designed. By comprehensively considering the agents' own capabilities, neighbor influences, and mission-driven factors, the autonomous matching and decision-making of mission requirements are realized, ensuring that satellite agents can allocate satellite resources reasonably. Next, the publish-subscribe mechanism of satellite constellations is constructed to achieve the precise docking of satellite resources and user requirements. Finally, an on-orbit verification experiment of the publish-subscribe service process of satellite constellations is carried out. The construction of satellite resource capabilities, the autonomous mission assignment algorithm, and the publish-subscribe service process of the capability view are realized. The instantaneous capacity subscription response time between the satellite and the ground (including the communication time of the space-to-ground link) is 31 seconds, verifying the feasibility and effectiveness of the capability and cognitive model and providing a basis for its practical application.

Key words Capability view, Satellite constellation, Satellite agent, Autonomous mission assignment, Linear group over a finite field

0 引言

随着航天技术的迅猛发展,小卫星、微纳卫星^[1]以及卫星组网技术^[2]取得了长足进步,未来天基资源在规模与能力方面将迎来爆发式增长.这一趋势使得由多颗卫星通过星间链路构成的卫星集群成为可能,进而能够协同完成更为复杂的空间任务,如地球观测、目标识别跟踪、通信、导航等.大规模卫星集群凭借其分布式特性和强大的协同能力,在众多复杂任务场景中展现出巨大潜力,成为未来空间任务执行的关键手段^[3,4].

然而,大规模卫星集群在执行复杂任务时,面临着资源管理和任务规划的多重挑战^[5].一方面,卫星资源种类多样、规模庞大且分布广泛,实现高效的资源配置困难重重;另一方面,卫星的状态和能力差异显著,任务规划需要综合考虑众多因素,增加了管理的复杂性^[6].此外,随着航天应用的拓展,用户需求日益多样化和复杂化,卫星资源与用户需求之间的匹配

变得困难,传统方法难以实现精准对接,常导致资源浪费或任务执行效果不佳^[7].因此,如何构建一种能够有效组织卫星资源、准确认知卫星能力,并实现卫星资源与用户需求精准匹配的方法,成为解决卫星集群协同问题的关键.

为解决这些问题,本文提出一种新的卫星资源与用户需求匹配的方法,实现卫星集群资源的高效管理和任务的合理分配,旨在提升卫星集群执行复杂任务的能力,满足卫星集群对用户需求的的有效匹配和快速执行.

本文所分析的智能体即卫星,是具备独立认知和决策能力的个体,集群可以理解多智能体系统.每颗卫星都拥有独特的物理特性和功能,这些特性决定了其在集群中所扮演的角色以及所能发挥的能力作用,例如不同类型的卫星搭载不同的载荷,从而具备不同的观测、计算、通信等能力,其通过感知环境、与其他卫星交互信息以及对自身能力的认知,共同参与集群的协同工作.任务是指卫星集群所面临的各种工

作要求, 其具有多样性和复杂性的特点, 涵盖了众多领域, 例如地球观测任务可包括气象监测、地形测绘等具体工作, 目标识别跟踪任务涉及对地面、海域和空中等目标的监测与追踪, 通信任务包含数据中继、全球通信覆盖等内容, 导航任务则主要为用户提供高精度的定位服务等. 能力是卫星智能体完成任务的关键要素, 主要由卫星搭载的载荷所确定, 通过抽象和虚拟化等方法可将其称为能力, 具体包括观测能力(利用光学或雷达设备获取目标信息)、通信能力(实现卫星间或卫星与地面之间的数据传输)和计算能力(进行数据处理、分析等操作)等. 资源约束则是由于卫星在轨运行时面临高动态、低保障、难利用等特性, 在执行任务过程中会受到各种条件限制, 例如观测条件对观测能力的限制、卫星最大最小开机时间的规定、能源供应的限制、数据存储容量的约束、计算能力上限以及部分功能不能并行执行等情况.

综上所述, 本文构建的卫星资源与用户需求匹配的方法, 可实现卫星集群资源的高效管理和任务的合理分配, 有望有效解决大规模卫星集群执行复杂任务时面临的问题, 提升卫星集群的整体性能和自主化水平.

1 理论基础

对于任务驱动的大规模卫星集群, 精准且高效的数学建模是解决复杂的资源优化和认知一致性问题的基础^[8-10]. 为了实现智能体间的高效信息交换和任务协同, 引入有限域和线性群^[11,12]的高级代数理论, 将卫星智能体的能力和认知状态映射为数学结构上的元素, 用于智能体的能力建模、认知状态更新以及任务匹配的算法设计和优化.

1.1 有限域与线性群

定义 1 有限域是包含有限个元素的域, 通常表示为 F_q , 其中 q 为素数 p 的幂, 即 $q = p^n$, n 为正整数. 有限域的关键特性在于其封闭性和代数结构, 其加法与乘法的封闭性和可逆性, 保证了代数运算在有限域内的完整性素数域. 有限域的另一个特性是元素的循环性, 即乘法群 $F_q^\times$ 是循环群, 这对于构造生成元和理解群结构非常重要.

定义 2 (一般线性群) 一般线性群 $G_L(n, F_q)$ 是指在有限域 F_q 上, 所有 $n \times n$ 阶可逆矩阵组成的群, 矩阵的乘法作为群运算. $G_L(n, F_q)$ 作用于 n 维向量空间 F_q^n , 这种作用是线性的, 保持了向量空间的结构.

通过特征标理论可以分析群的性质, 为后续的任务分配和认知建模提供理论支持.

1.2 有限域与线性群结构特性的作用

有限域 F_q 的封闭性, 使智能体能力和认知状态的运算始终在同一域内进行. 在自组织任务分配过程中, 智能体的能力和认知状态被表示为有限域上的向量和矩阵. 由于有限域在加法和乘法运算下是封闭的, 任何运算结果都不会超出域的范围, 避免了计算溢出和不确定性问题, 保证了系统的准确性和一致性.

线性群 $G_L(n, F_q)$ 的可逆性, 赋予了智能体能力表示的灵活性. 智能体的能力由可逆矩阵构成, 这使得智能体能够执行特定任务, 并能通过矩阵运算调整自身能力以适应不同的任务. 任务分配问题因此可转化为求解线性方程组的问题, 利用线性群的可逆性, 智能体能够高效地计算出满足任务的能力调整方案.

不可约多项式构造扩域. 将基础域 F_p 扩展到 F_{p^n} , 引入了新的元素, 丰富了智能体能力的表示空间. 这些新元素充当构建复杂能力结构的“基元”, 使智能体能够应对高复杂度和动态性的任务. 扩域后的代数结构自然地表示了更复杂的任务和能力依赖关系, 保证了任务分配的灵活性和精细度.

同态映射. 对于任务被映射为智能体的认知状态更新这一过程, 利用线性群的同态性质, 确保任务向量与能力矩阵之间的转换保持代数结构的一致性. 这种同态映射保证认知状态更新的准确性和高效性, 使任务在有限资源约束下得到合理分配.

有限域和线性群的代数特性, 确保系统的认知一致性和稳定性. 在多次迭代和信息交互过程中, 利用线性群的结构特性, 系统需要实现认知收敛, 从而实现高效、可靠的自组织任务分配.

基于上述有限域和线性群的理论基础, 进一步构建卫星智能体的能力模型和认知状态向量, 这是实现整个卫星集群高效协作和任务分配的关键步骤. 通过将这些理论与卫星智能体的实际能力和认知相结合, 能够为后续的自主任务分配算法设计以及能力视图和交互式发布订购机制的构建提供坚实的数学支撑, 确保各部分紧密协作, 共同应对大规模卫星集群执行复杂任务时所面临的挑战.

1.3 基本概念

1.3.1 卫星(智能体)

在大规模卫星集群中, 卫星被视为具有独立认知

和决策能力的智能体. 每个智能体具备独特的物理特性和功能, 这些特性决定了其在集群中的角色和能力表现. 智能体通过感知外界环境、与其他智能体进行信息交互以及对自身能力的认知, 参与集群的协同工作. 例如, 不同类型的卫星可能配备不同的载荷, 从而具备不同的观测、计算、通信能力, 这些能力在集群任务中相互协作, 共同完成复杂的任务目标.

1.3.2 用户需求

用户需求指各类用户根据自身的应用目的和业务需求提出的对卫星资源及服务的期望与要求. 用户需求具有多样性, 不同的用户群体可能有截然不同的需求重点. 例如, 科研用户可能更关注高分辨率、高精度的观测数据进行科学研究; 气象部门可能需要卫星持续提供大面积的气象数据监测服务; 通信企业则侧重于卫星通信链路的带宽、稳定性和覆盖范围等通信能力方面的需求.

用户需求包含了任务的目标、任务执行的时间范围、空间区域、所需能力类型及水平、数据传输要求等多方面信息. 卫星集群接收到用户需求后, 需要将其转化为内部可处理的任务形式, 并依据卫星集群的资源状况、能力模型以及任务分配算法等, 尽力满足用户需求, 实现卫星资源与用户需求之间的有效匹配和对接. 同时, 用户需求的动态变化也要求卫星集群具备良好的灵活性和适应性, 能够及时响应和调整任务安排, 以适应不断变化的用户期望.

1.3.3 复杂任务

在卫星集群中, 复杂任务是指一系列具有综合性、高要求且需要多颗卫星协同完成的工作指令集合. 其来源主要是各类用户基于不同的应用场景和实际需求所提出的任务请求 (用户需求), 例如政府部门、科研机构、商业公司等各类用户基于地球观测、气象监测、资源勘探、通信保障、导航定位等目的提出的相应任务请求.

任务被定义为明确规定卫星集群在特定时间范围内、针对特定空间区域或目标, 运用多种卫星资源 (例如观测、计算、通信等载荷资源) 执行特定操作以达成特定目标的详细指令. 任务可以涵盖地球观测 (气象监测、地形测绘等)、目标识别跟踪 (空间碎片监测、航天器追踪等)、通信 (数据中继、全球通信覆盖等) 以及导航 (提供高精度定位服务等) 等多个领域. 例如, 地球观测任务可能是在特定时间段内对某一特

定地理区域进行多波段、多分辨率的连续观测, 获取该区域的地形地貌、植被覆盖、气象变化等信息; 目标跟踪任务是利用卫星的探测载荷持续锁定并追踪特定航天器或地面目标的运行轨迹.

1.3.4 能力

卫星的能力是指能够为用户提供价值 (满足用户需求) 的能力, 即卫星能够为用户提供未来信息的能力, 包括信息获取能力、信息计算能力和信息传输能力, 是卫星所具备能力的逻辑抽象. 卫星智能体的能力是通过卫星搭载的载荷确定的, 通过抽象、虚拟化等方法可将卫星资源转化为卫星能力, 能力描述与天基资源分类对应关系如下.

(1) 信息获取能力. 是否能够观测到需要的目标, 最快什么时间拍到, 对应观测、探测类资源, 下文以观测能力为例进行描述.

(2) 信息计算能力. 可以处理出什么数据, 需要多长时间, 对应计算类资源, 下文简称计算能力.

(3) 信息传输能力. 什么时间能够拿到数据, 数据是否会损坏 (传输质量), 对应通信类资源, 下文以星间、星地通信能力为例进行描述, 简称通信能力. 通过不同能力组合 (即卫星组合、卫星集群) 来完成复杂任务, 达到满足用户需求的目标.

1.3.5 资源约束

卫星资源作为一种信息资源, 受卫星在轨运行、高动态、低保障、难利用等特性的影响, 在执行任务时会受到各种条件的影响, 称为资源约束, 例如观测条件与观测能力约束 (云层、光照影响光学观测, 地形、地物反射影响雷达观测, 且观测设备性能决定观测上限)、最大最小开机时间约束、能源约束 (太阳能获取受限, 蓄电池容量有限)、存储约束 (存储设备容量有限, 数据存储与程序占用空间)、计算约束 (处理器性能与内存容量有限, 影响数据处理效率与任务执行)、部分功能不能并行的约束 (硬件架构与资源限制导致部分功能不能同时执行) 以及通信约束 (邻星通信受距离、速度、频段、姿态影响, 距离增加导致信号损耗, 相对运动引起多普勒频移, 不同频段特性各异, 姿态变化影响天线指向与通信效果).

2 卫星集群能力与认知模型

为了实现卫星集群智能体间的高效协作和任务

分配, 需要建立一个能够精确描述卫星智能体能力和认知状态的数学模型. 通过引入有限域上的线性代数结构, 可将卫星智能体的能力和认知状态映射为数学上的矩阵和向量, 从而利用代数方法进行分析 and 计算. 下文智能体指代卫星.

2.1 智能体能力模型

在卫星智能体的能力模型中, 能力矩阵用于系统化地表示卫星的各项能力. 能力矩阵通过量化每颗卫星在不同任务环境下的各项能力, 形成一个多维的矩阵结构. 每一行或每一列代表不同类型的的能力 (观测、计算、通信等), 矩阵的元素则反映这些能力在特定条件下的实际表现. 能力矩阵的作用在于帮助明确卫星集群中每颗卫星的具体能力配置, 使得能够高效地进行任务分配和资源调度. 在多任务执行场景中, 能力矩阵能够根据任务要求快速匹配最适合的卫星, 从而避免能力浪费或任务执行效率低下. 通过能力矩阵, 能够量化不同卫星之间的能力差异, 为任务分配提供明确的依据, 确保任务能在合适的卫星上得到高效执行.

定义 3 能力向量 $\mathbf{c}_i$, 对于智能体 i , 其能力可以表示为一个 n 维向量 $\mathbf{c}_i \in \mathbf{F}_q^n$, 其中第 k 个分量 c_{ik} 表示该智能体在第 k 种能力上的水平或者是否具备该能力. $c_{ik} \in \{0, 1\}$ 表示是否具备某种能力, 或者 $c_{ik} \in F_q$ 表示能力的强度或等级.

定义 4 能力矩阵 $\mathbf{A}_i$, 为了描述智能体能力之间的内在关联和转换关系, 为智能体 i 构建一个 $n \times n$ 的能力矩阵 $\mathbf{A}_i \in G_L(n, F_q)$, 其中 $G_L(n, F_q)$ 表示在有限域 F_q 上所有 $n \times n$ 阶的可逆矩阵集合. 矩阵 $\mathbf{A}_i$ 的元素 $a_{jk} \in F_q$ 表示智能体 i 在能力 j 上对能力 k 的影响或转换关系.

2.1.1 构造能力矩阵

定义能力空间的标准基向量集合, 即

$$\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n\}. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{e}_k$ 是一个 n 维向量, 在第 k 个位置为 1, 其余位置为 0.

智能体 i 的能力向量 $\mathbf{c}_i$ 可以表示为标准基向量的线性组合, 即

$$\mathbf{c}_i = \sum_{k=1}^n c_{ik} \mathbf{e}_k. \quad (2)$$

其中 $c_{ik} \in F_q$.

能力矩阵生成, 为了构造能力矩阵 $\mathbf{A}_i$, 需考虑智能体能力之间的相互作用和影响. 一个常用的方法是将能力矩阵构造为

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{I}_n + \alpha_i (\mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^T). \quad (3)$$

其中, $\mathbf{I}_n$ 为 $n \times n$ 阶的单位矩阵, $\alpha_i \in F_q^\times$ 是一个非零元素 F_q 中的乘法逆元存在的元素, 用于调节矩阵的特性. $\mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^T$ 是能力向量 $\mathbf{c}_i$ 与其转置的外积, 生成一个 $n \times n$ 阶的矩阵, 反映了能力之间的相互作用.

2.1.2 可逆性约束

行列式计算: 为确保 $\mathbf{A}_i$ 是可逆的, 需要验证 $\det(\mathbf{A}_i) \neq 0$. 利用行列式的性质, 有

$$\det(\mathbf{A}_i) = \det[\mathbf{I}_n + \alpha_i (\mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^T)] = (1 + \alpha_i \mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i). \quad (4)$$

由于 $\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i = \sum_{k=1}^n c_{ik}^2$, 在有限域 F_q 上, $c_{ik}^2 = c_{ik}$, 因为 $c_{ik} \in \{0, 1\}$ 或取有限域元素, 因此

$$\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i = \sum_{k=1}^n c_{ik}. \quad (5)$$

只要选择 α_i 使得 $1 + \alpha_i \sum_{k=1}^n c_{ik} \neq 0$, 则 $\mathbf{A}_i$ 就是可逆矩阵.

选择 α_i : 为了确保可逆性, 应避免 $\alpha_i = -1 / \sum_{k=1}^n c_{ik}$. 在有限域中, 满足上述条件下 α_i 可以选取为任何非零元素.

2.1.3 示例

设 3 种能力, 即观测能力 O , 计算能力 P , 通信能力 C , 对应 $n = 3$. 取有限域 F_5 (即 $q = 5$), 元素为 $\{0, 1, 2, 3, 4\}$. 智能体 i 具备观测和计算能力, 其能力向量为

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

选择 $\alpha_i = 2 \in F_5^\times$, 则能力矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \mathbf{I}_3 + 2 (\mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^T) = \mathbf{I}_3 + 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{I}_3 + 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

计算得到

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在 F_5 上, 矩阵 $\mathbf{A}_i$ 的元素均为有限域内的元素.

验证 $\det(\mathbf{A}_i)$, 有

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}_i) &= 3(1 \times 3 - 0 \times 0) - 0(0 \times 3 - 0 \times 2) + \\ &\quad 2(0 \times 0 - 1 \times 2) = 3(3) - 0 + 2(0 - 2) = \\ &\quad 9 + 0 - 4 = 5 \mod 5 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

发现 $\det(\mathbf{A}_i) = 0$ (模 5 意义下), 说明矩阵不可逆. 这表示需要重新选择 α_i 或检查计算过程.

修正: 重新选择 $\alpha_i = 1 \in F_5^\times$, 则能力矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \mathbf{I}_3 + 1 \times (\mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^T) = \mathbf{I}_3 + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &\quad \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

计算如下行列式:

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}_i) &= 2(1 \times 2 - 0 \times 0) - 0(0 \times 2 - 0 \times 1) + \\ &\quad 1(0 \times 0 - 1 \times 1) = 2(2) - 0 + 1(0 - 1) = \\ &\quad 4 - 0 - 1 = 3 \mod 5 = 3 \end{aligned} \quad (11)$$

$\det(\mathbf{A}_i) = 3 \neq 0$, 矩阵 $\mathbf{A}_i$ 可逆. 矩阵 $\mathbf{A}_i$ 的非零元素反映了智能体在不同能力上的水平和能力之间的关联. 通过矩阵 $\mathbf{A}_i$ 作用于向量, 可以实现能力之间的转换和组合, 体现智能体的能力结构.

2.1.4 广义的能力矩阵构造

为更广泛适用于不同的能力结构, 将能力矩阵 $\mathbf{A}_i$ 构造为

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{D}_i + \mathbf{R}_i. \quad (12)$$

其中, $\mathbf{D}_i$ 为对角矩阵, 元素 d_{ik} 表示智能体 i 在能力 k 上的固有水平; $\mathbf{R}_i$ 为余矩阵, 表示能力之间的相互影响或耦合关系. 通过适当选择 $\mathbf{D}_i$ 和 $\mathbf{R}_i$ (可以通过网格调参等机器学习迭代优化方式), 并确保 $\det(\mathbf{A}_i) \neq 0$, 可以构造出符合实际需求的能力矩阵.

2.2 卫星集群的能力认知状态向量

能力认知向量关注卫星智能体对自身能力的认知及其在特定任务中的适用性. 能力认知向量反映的是每颗卫星在不同任务和环境下对自己能力的评估. 这一认知过程是动态的, 能够随着任务、环境变化和

卫星自身状态的不同而变化. 每颗卫星的能力认知向量可能因对任务的预判、对环境变化的适应以及对自身能力的估计不同而有所不同, 这种差异直接影响到任务调度中的决策过程. 因此, 能力认知向量是对卫星当前能力的描述, 也是对其如何调整决策、优化资源使用的一种预测机制. 在任务执行中, 能力认知向量帮助卫星智能体做出更加灵活和合理的决策, 确保其在复杂和多变的环境下实现任务的高效执行.

定义 5 认知向量 $\mathbf{v}_i$, 智能体 i 的认知状态表示为一个 n 维向量 $\mathbf{v}_i \in F_q^n$, 其中每个分量 v_{ik} 表示智能体对第 k 种能力的认知程度, $v_{ik} \in F_q$.

2.2.1 认知状态的更新机制

智能体的认知状态随着时间和与其他智能体的交互而变化. 认知状态的更新由下式给出:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{v}_i(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t). \quad (13)$$

其中, $\mathbf{v}_i$ 为智能体 i 在时间 t 的认知向量, $\mathbf{A}_i$ 为智能体 i 的能力矩阵, N_i 为智能体 i 的邻居集合, 即与 i 有直接通信连接的智能体集合, $w_{ij} \in F_q$ 是从智能体 j 到 i 的权重系数, 反映了智能体 i 对其邻居 j 的认知信息的信任程度或依赖程度. 通常要求 $\sum_{j \in N_i} w_{ij} = 1$. $\mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t)$ 表示邻居智能体 j 的认知状态经过其能力矩阵 $\mathbf{A}_j$ 的转换, 其内涵可理解为邻居的能力对认知信息的影响.

通信连接 N_i 的计算: 通信连接 N_i 表示智能体 i 的邻居集合, 即当前能够直接通信的其他智能体. 通信连接的计算取决于以下因素.

(1) 轨道状态与相对位置. 由于卫星处于不断运动中, 其轨道状态和相对位置会影响通信可达性. 利用卫星的轨道参数和位置预测模型, 确定在当前时间步长内位于通信范围内的卫星.

(2) 通信能力. 每颗卫星的通信设备性能 (例如天线增益、发射功率、频段) 会影响通信距离和质量. 只有当两颗卫星之间的距离在其通信能力范围内, 且信道条件允许时, 才能建立通信连接.

(3) 动态环境因素. 大气扰动、空间干扰和设备故障等因素也会影响通信连接, 根据任务在模型中增加影响因子.

信任权重 w_{ij} 的计算: 信任权重 w_{ij} 反映了智能体 i 对其邻居 j 的信息信任程度或依赖程度, 计算方法如下.

(1) 历史交互记录. 根据智能体 i 与邻居 j 过去的交互历史, 如信息准确性、任务完成情况等, 建立信任评分.

(2) 能力匹配度. 邻居 j 的能力是否与当前任务相关, 相关性越高, 信任权重越大.

(3) 通信质量. 结合当前的通信质量指标 (例如信噪比、丢包率等), 调整信任权重.

(4) 归一化处理. 为满足 $\sum_{j \in N_i} w_{ij} = 1$ 的条件, 对计算得到的权重进行归一化.

信任权重 w_{ij} 是动态的, 会随着时间和环境变化进行调整, 以反映最新的信任关系.

更新项 $\mathbf{A}_i \mathbf{v}_i(t)$: 智能体基于自身的能力和当前的认知状态进行更新, 体现了自主学习或调整.

交互项 $\sum_{j \in N_i} w_{ij} \mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t)$: 智能体从邻居处获取认知信息, 并根据邻居的能力矩阵和权重系数进行融合, 反映了信息共享和协作学习.

认知状态更新示例: 假设在时间 t , 智能体 i 的认知向量为

$$\mathbf{v}_i(t) = \begin{bmatrix} v_{i1}(t) \\ v_{i2}(t) \\ v_{i3}(t) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

假设智能体 i 有两个邻居 j 和 k , 其权重系数分别为 w_{ij} 和 w_{ik} , 满足 $w_{ij} + w_{ik} = 1$, 邻居智能体的认知向量和能力矩阵分别为 $\mathbf{v}_j(t)$, $\mathbf{A}_j$ 和 $\mathbf{v}_k(t)$, $\mathbf{A}_k$, 则智能体 i 的认知状态在时间 $t+1$ 更新为

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{v}_i(t) + w_{ij} \mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t) + w_{ik} \mathbf{A}_k \mathbf{v}_k(t). \quad (15)$$

2.2.2 认知状态的代数特性

线性: 认知状态的更新是线性的, 所有运算均在有限域 F_q 上进行, 以确保计算的简洁性和封闭性.

可逆性与稳定性: 能力矩阵 $\mathbf{A}_i$ 的可逆性保证智能体能够解码或逆向推导认知信息, 确保了认知状态更新过程的稳定性和可靠性.

2.2.3 收敛性

全局认知向量: 将所有智能体的认知向量组合成全局认知向量, 即

$$\mathbf{V}(t) = [\mathbf{v}_1(t)^T, \mathbf{v}_2(t)^T, \dots, \mathbf{v}_m(t)^T]^T, \quad (16)$$

其中, m 为智能体数量.

全局更新矩阵: 定义全局更新矩阵 $\mathbf{M}$, 使得 $\mathbf{V}(t+1) = \mathbf{M}\mathbf{V}(t)$, 矩阵 $\mathbf{M}$ 包含各智能体的能力矩

阵和权重系数, 反映整个智能体网络的拓扑结构和能力分布.

谱半径与收敛性: 如果矩阵 $\mathbf{M}$ 的谱半径 (最大特征值的模) 小于 1, 则 $\mathbf{V}(t)$ 将收敛到零向量; 如果存在特征值为 1, 且其对应的特征向量为一致向量, 则 $\mathbf{V}(t)$ 将收敛到一致的认知状态.

通过引入有限域和线性群的代数理论, 构建了卫星智能体的能力模型和认知状态向量, 将能力映射为有限域上的矩阵, 认知状态映射为向量, 提供卫星智能体能力结构和认知状态的精确描述, 为后续任务分配等操作提供建模方法和逻辑依据. 基于此能力与认知模型, 构建基于能力模型的卫星集群能力视图, 通过组织和处理能力数据, 设计能力视图, 为用户提供直观的能力显示, 便于资源订购和管理; 设计自主任务分配算法, 实现卫星集群在复杂环境下任务的自主匹配与决策; 建立卫星集群能力发布订购机制, 实现卫星集群资源与用户需求的精准匹配, 以及卫星集群资源的高效管理和任务的合理分配.

3 基于能力与认知模型的卫星集群能力视图构建

在构建卫星集群的能力与认知模型之后, 为了使卫星集群的能力信息能够直观地呈现给用户, 支持多用户、多优先级的资源订阅和管理, 需要构建基于能力与认知模型的卫星集群能力视图. 这一能力视图将作为用户与卫星集群资源交互的可视化界面, 为后续的任务分配和资源管理提供用户交互手段.

能力视图就是将能力可视化, 将不同的能力按照其类别、空间、区域、时间等特征在一个或多个视窗页面中进行显示, 但面临卫星集群的规模大、能力种类多、数据信息量大的问题, 需要设计高效的组织和管理方法, 为用户提供直观可用的能力视图.

3.1 能力视图构建的基础与目标

3.1.1 能力数据的组织与处理

为支持能力视图的实现, 要对卫星集群能力数据合理组织和处理. 能力数据来源包括卫星状态数据 (卫星位置、轨道信息、载荷状态等)、卫星能力数据 (观测、计算、通信能力等) 和任务状态数据 (反映当前卫星集群中任务的分布与执行情况). 这些数据采用分层组织方式, 分为设备属性、单卫星能力、集群

能力等层次 (见表 1). 设备属性层描述单个卫星的基础属性, 例如轨道状态和位置, 为理解卫星的基本运行状况提供依据; 卫星能力层反映单个卫星的具体能力指标, 明确每颗卫星的能力特点; 集群能力层综合多个卫星能力, 为整体能力视图的呈现提供全面的信息基础. 通过这种分层组织方式, 能够有效地整合和管理能力数据, 为能力视图的生成奠定坚实数据基础.

能力视图设计目标旨在解决卫星集群能力信息显示与交互等关键问题, 具体描述如下.

- (1) 卫星集群的观测、计算、通信等能力信息具有多维属性, 需在有限显示空间内有效传达, 确保用户快速获取关键信息.
- (2) 卫星能力随时间和空间变化, 能力视图要能动态更新, 实时反映集群能力状态.
- (3) 为用户提供友好交互手段, 使其能根据自身需求订购卫星资源.
- (4) 支持不同优先级用户访问和订购不同范围卫星资源, 实现资源合理分配.

3.1.2 能力视图场景下的可视化问题与解决方案

在能力视图场景下, 可视化需解决两个问题: 一是在有限屏幕空间显示卫星互联网繁杂信息, 二是让用户快速找到关注信息.

表 1 能力数据结构层次
Table 1 Capability data structure hierarchy

数据层次	描述
设备属性层	描述单个卫星的基础属性, 如轨道状态和位置
卫星能力层	反映单个卫星的具体能力指标
集群能力层	综合多个卫星的能力, 提供整体能力视图

从交互角度出发, 可通过由用户设定限定条件减少信息量, 加快数据响应速度. 从显示角度, 依据特定场景使用 Overview/Detail 范式来组织和呈现图层. 该范式下同时显示多个视口, Overview 视口呈现数据整体概观, Detail 视口从多个角度显示场景中某个区域的细节, 从而提高信息显示的有效性和用户查找信息的效率.

3.2 能力视图的类型与功能

3.2.1 观测能力视图

功能描述. 观测能力视图用于描述卫星集群对于特定区域在一定时间段内的获取能力, 涵盖遥测频段、图像分辨率等关键信息. 通过这一视图, 用户可以清晰地了解指定区域上, 未来某段时间内卫星集群对该区域的观测频度、观测强度以及观测精度, 从而全面掌握卫星集群在观测方面的能力表现.

显示方式. 用户首先交互选择一块空间区域, 并指定关注的时间段, 能力视图随即显示该区域内的获取能力情况. 卫星资源的信息获取能力通过覆盖条带的方式进行显示, 不同的覆盖条带代表不同的观测属性 (例如不同分辨率的观测范围等), 用户可直观地看到如图 1 所示的在选定区域和时间段内卫星集群的观测覆盖情况.

当卫星集群数量增加后, 为避免能力视图显示混乱, 可采用类似热力图的形式来显示卫星能力, 根据获取能力的不同属性 (例如观测频度、图像分辨率等) 生成多种热力图, 颜色深浅表示获取能力程度, 用户可使用网格进行选择需要的能力, 界面如图 2 所示.

3.2.2 传输能力视图

功能描述. 传输能力视图用于描述特定时刻两个端点间通过卫星互联网链路进行数据传输的能力, 包

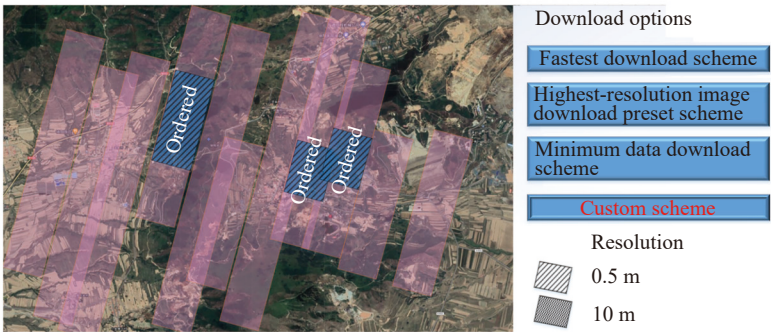


图 1 能力视图的发布及订购
Fig. 1 Publication and subscription of capability views

括预期的传输带宽、传输质量等重要参数. 用户可以借助这一视图了解未来某段时间感兴趣的两个端点间的传输能力状况, 或者预定未来某段时间的某条链路带宽, 同时还能获取相关范围之内地面设备的接入情况, 为用户提供全面的传输能力信息.

显示方式. 用户交互指定上行起点和下行终点以及关注的时段后, 传输能力视图根据卫星集群能够提供的传输能力, 显示出匹配度最高的若干条传输链路. 在通信链路上, 用不同的线条宽度表示预期中的可用传输带宽, 线条越宽表示带宽越高; 用不同的颜色表示预期传输质量, 例如绿色表示高质量, 黄色表示中等质量, 红色表示低质量 (见图 3), 这种直观的

显示方式有助于用户快速理解和评估传输能力.

3.2.3 多用户多优先级支持

不同优先级用户在访问和订购卫星资源时具有不同的权限和范围. 高优先级用户可以优先获取资源, 并享有更广泛的资源选择权限; 低优先级用户则在资源分配上相对受限. 能力视图根据用户的优先级进行定制化显示, 为不同用户提供与其权限相符的能力信息. 例如在观测能力视图中, 高优先级用户可能看到更详细、更全面的观测资源信息, 包括一些高分辨率观测设备的实时状态; 而低优先级用户可能只能获取部分公共观测资源的信息. 不同优先级用户的能力如图 4 所示, 其中图 4(a) 为高优先级用户, 图 4(b)

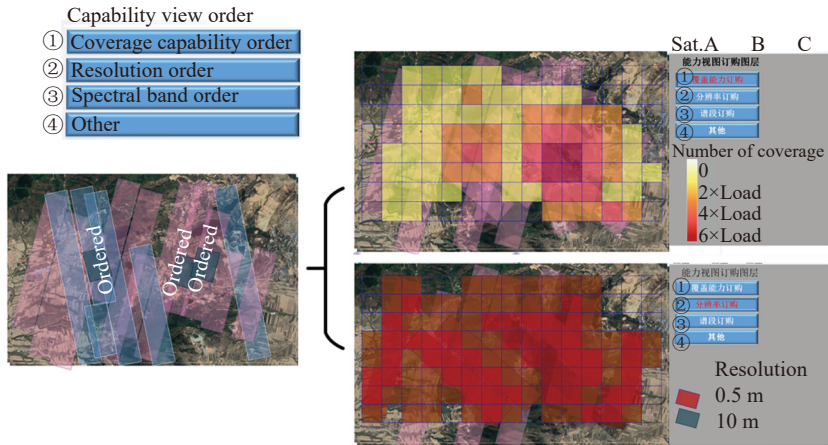


图 2 采用类似热力图的形式显示卫星能力

Fig. 2 Display satellite capabilities in a form similar to a heat map

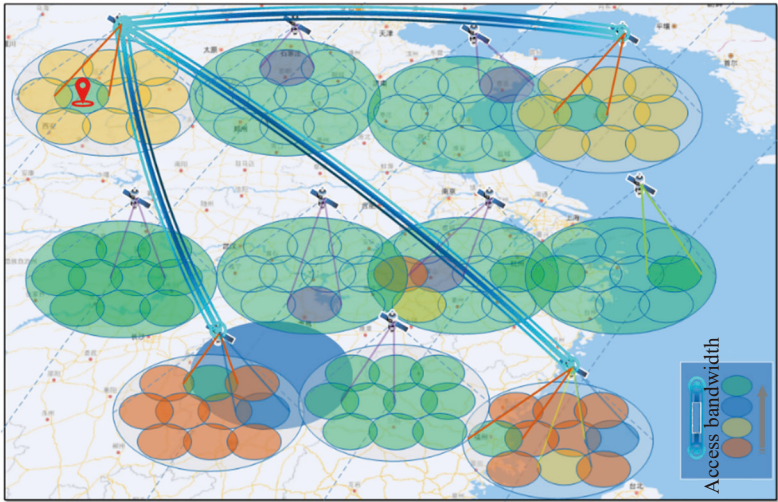


图 3 传输能力视图

Fig. 3 Transmission capability view

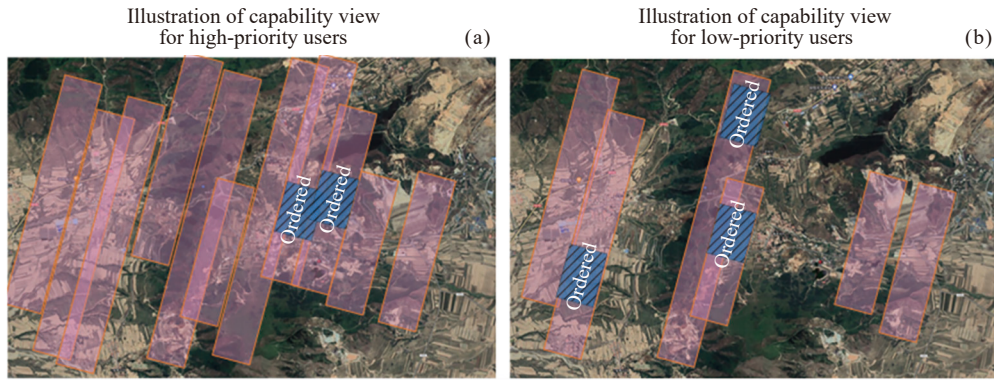


图4 不同优先级用户的能力视图

Fig. 4 Schematic diagram of capability views for users of different priorities

为低优先级用户. 从图4可以看到, 高优先级用户的能力可供选择性大于低优先级用户. 这种多用户多优先级支持机制可以确保资源的合理分配, 满足不同用户的多样化需求, 提高卫星集群资源的利用效率.

通过构建基于能力与认知模型的卫星集群能力视图, 为用户提供了一个直观、高效的资源交互与管理界面, 为后续自主任务分配算法的实施和整套方法的有效运行奠定了重要基础. 接下来, 将基于这些能力与认知模型, 阐述卫星集群自主任务分配算法的设计与实现.

4 基于能力与认知模型的卫星集群自主任务分配算法

在完成卫星集群能力与认知模型构建以及能力视图设计的基础上, 为实现卫星集群在复杂动态环境下的高效协同和任务分配, 需要设计基于能力与认知模型的自主任务分配算法. 该算法将综合考虑智能体自身能力、邻居影响和任务驱动等多方面因素, 确保卫星智能体能够准确地对任务进行自主匹配和决策, 实现卫星集群资源的优化配置和任务的合理分配.

在前述理论基础和建模部分, 利用有限域和线性群的代数结构, 建立了卫星集群的能力与认知模型. 在此基础上设计自主任务分配算法, 以实现卫星集群在复杂动态环境下的高效协同和任务分配.

算法将任务转化为向量形式, 向量包含不同能力的需求程度, 反映智能体在各类能力上的水平; 任务向量通过网络发布给所有智能体, 每个智能体在初始化阶段评估自身的能力, 并构建能力矩阵; 在每轮迭

代中, 智能体通过与邻居进行信息交换, 获取邻居的认知状态, 通过加权求和的方式整合进智能体的认知状态中, 当认知状态达到收敛条件后, 智能体计算自身能力与任务的匹配度, 如果匹配度超过预设的阈值, 智能体决定参与任务, 并根据各自的能力进行任务分配, 实现卫星集群的任务分配. 之后, 所有智能体的认知状态被整合成一个全局状态矩阵, 进行全局更新, 从而实现卫星集群任务分配的自主性. 算法流程如图5所示.

4.1 任务表示与发布

任务被表示为有限域 F_q 上的 n 维向量 $\mathbf{T} \in F_q^n$, 其中每个分量 T_k 表示任务在第 k 种能力上的需求程度. 任务向量由任务中心或任务发起智能体生成, 并通过网络广播或多播方式发布. 任务向量的构造应考虑任务的复杂度和紧急程度, 不同任务可能需要不同的能力组合, T_k 的取值反映了这一需求.

4.2 智能体初始化与能力评估

每个智能体 i 进行以下初始化步骤.

(1) 能力向量 $\mathbf{c}_i \in F_q^n$: 根据自身的物理特性和功能, 确定能力向量, 其中 c_{ik} 表示智能体在第 k 种能力上的水平或具备情况.

(2) 能力矩阵 $\mathbf{A}_i \in G_L(n, F_q)$: 利用前述方法构建可逆的能力矩阵, 确保矩阵的行列式不为零.

(3) 初始认知向量 $\mathbf{v}_i(0) \in F_q^n$: 可初始化为零向量, 或根据先验信息进行设定.

4.3 信息交互与认知更新

在每一轮迭代中, 智能体执行以下操作.

(1) 接收邻居信息: 从邻居集合 N_i 中的智能体接收其认知向量 $\mathbf{v}_j(t)$.

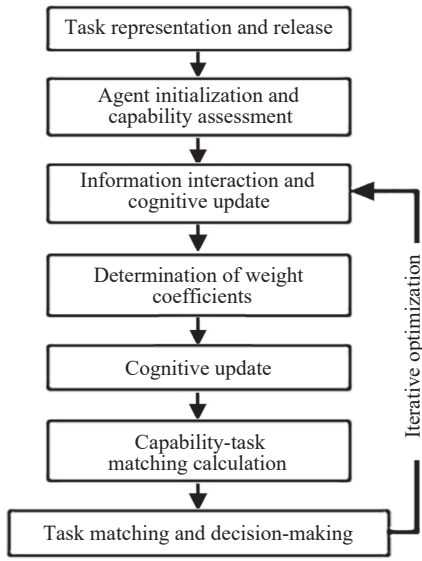


图5 卫星集群自主任务分配算法流程

Fig. 5 Flowchart of satellite cluster autonomous task allocation algorithm

(2) 更新认知状态: 按照以下更新规则

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{v}_i(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t) + \gamma_i \mathbf{T}. \quad (17)$$

其中, $w_{ij} \in F_q$ 为从智能体 j 到 i 的权重系数, 满足 $\sum_{j \in N_i} w_{ij} = 1$; $\gamma_i \in F_q$ 为任务驱动系数, 反映智能体对任务的敏感度; $\mathbf{T}$ 为任务向量, 作为外部输入驱动智能体的认知更新。

4.4 权重系数的确定

权重系数 w_{ij} 可以根据以下因素确定。

(1) 通信质量: 对信道质量高的邻居赋予更高的权重。信道质量的量化指标为 Q_{ij} (取值范围为 $[0, 1]$, 1 表示通信质量最佳, 0 表示通信中断), 则基于通信

质量的权重分量可表示为 $w_{ij}^Q = \frac{Q_{ij}}{\sum_{j \in N_i} Q_{ij}}$ 。

(2) 能力匹配度: 对与自身能力互补的邻居赋予更高的权重。定义能力匹配度函数 M_{ij} (取值范围为 $[0, 1]$, 1 表示完全匹配, 0 表示完全不匹配), 其计算方式可以根据智能体 i 的任务向量 $\mathbf{T}$ 与智能体 j 的能力向量 $\mathbf{c}_j$ 之间的余弦相似度度量来确定。基于能力匹配

度的权重分量可表示为 $w_{ij}^M = \frac{M_{ij}}{\sum_{j \in N_i} M_{ij}}$ 。

(3) 历史信任度: 基于过去交互的可信度评估。设历史交互记录的信任评分记为 T_{ij} (取值范围为 $[0, 1]$, 1 表示完全信任, 0 表示完全不信任), 基于历史信任

度的权重分量可表示为 $w_{ij}^T = \frac{T_{ij}}{\sum_{j \in N_i} T_{ij}}$ 。

综合以上三个方面, 权重系数最终确定为 $w_{ij} = \alpha w_{ij}^Q + \beta w_{ij}^M + \gamma w_{ij}^T$, 其中 α, β, γ 为可调节的参数, 满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, 用于调整不同因素在权重计算中的相对重要性。在实际应用中, 这些参数可以根据卫星集群的任务特点和环境需求进行调整优化。

4.5 认知更新

更新规则综合了自身能力、邻居影响和任务驱动三方面因素。

(1) 自身能力项 $\mathbf{A}_i \mathbf{v}_i(t)$: 体现智能体对自身认知的巩固和调整。智能体 i 基于自身的能力矩阵 $\mathbf{A}_i$ 和当前的认知向量 $\mathbf{v}_i(t)$ 进行更新, 反映了其根据自身能力对当前认知状态的维持和优化。

(2) 邻居影响项 $\sum_{j \in N_i} w_{ij} \mathbf{A}_j \mathbf{v}_j(t)$: 反映智能体从邻居处获取信息并进行融合的过程。智能体 i 从邻居集合 N_i 中的智能体 j 接收其认知向量 $\mathbf{v}_j(t)$, 并根据权重系数 w_{ij} 和邻居智能体 j 的能力矩阵 $\mathbf{A}_j$ 进行加权求和, 从而将邻居的认知信息融入自身的认知更新中。

(3) 任务驱动项 $\gamma_i \mathbf{T}$: 使智能体的认知状态朝向任务进行调整。任务向量 $\mathbf{T}$ 作为外部输入, 通过任务驱动系数 γ_i ($\gamma_i \in F_q$) 对智能体的认知状态产生影响, 引导智能体的认知朝着满足任务的方向发展。

认知更新式 (17) 综合考虑了这三个方面的因素, 通过线性组合的方式实现了智能体认知状态的动态更新, 确保了智能体在自身能力基础上, 充分利用邻居信息, 并根据任务不断调整认知状态, 从而实现高效的任务分配和协作。

4.6 能力与任务匹配度计算

当认知状态满足收敛条件或达到预设的迭代次数后, 智能体进行任务匹配和决策。

(1) 匹配度计算: 计算智能体能力与任务的匹配度。例如通过内积

$$S_i = \langle \mathbf{c}_i, \mathbf{T} \rangle = \mathbf{c}_i^T \mathbf{T}. \quad (18)$$

(2) 参与决策: 设定参与阈值 θ , 如果 $S_i \geq \theta$, 则智能体决定参与任务。

4.7 任务匹配与决策

对于决定参与任务的智能体, 根据认知状态和能力进行任务分配是确保资源优化的关键步骤。这一过程涉及多个方面的考量, 基于智能体对自身能力的准确认知 (通过认知向量 $\mathbf{v}_i$ 体现) 以及对任务的理解, 结

合其实际能力水平 (能力向量 $\mathbf{c}_i$), 实现任务的合理分配和资源的高效利用.

4.7.1 基于认知和能力的任务分配原则

设任务可以分解为多个子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ ($k = 1, 2, \dots, m$), 每个子任务对不同能力有不同的需求程度, 用向量 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 表示. 对于参与任务的智能体 i , 其任务分配基于以下原则: 首先, 计算智能体 i 对每个子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 的胜任度 S_{ik} , 计算公式为 $S_{ik} = \mathbf{c}_i^T \mathbf{T}_{\text{sub},k} \times \omega_{ik}$, 其中 ω_{ik} 是一个基于认知向量 $\mathbf{v}_i$ 确定的权重因子, 用于衡量智能体 i 对执行子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 的信心或适应性. ω_{ik} 的计算可以基于认知向量 $\mathbf{v}_i$ 中与子任务相关的分量进行归一化处理, 例如如果认知向量 $\mathbf{v}_i$ 的某个分量 v_{il} 表示智能体 i 对与子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 相关的能力 l 的认知程度, 则 $\omega_{ik} = \frac{v_{il}}{\sum_l v_{il}}$ (假设与子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 相关的能力分量为 v_{il}).

4.7.2 资源优化与任务分配策略

根据计算得到的胜任度 S_{ik} , 采用贪心算法或其他优化算法进行任务分配. 具体策略是将每个子任务分配给胜任度最高的智能体, 同时要满足资源约束条件. 例如, 设智能体 i 执行子任务 $\mathbf{T}_{\text{sub},k}$ 所需资源量为 R_{ik} , 卫星集群的总资源量为 R_{total} , 则任务分配需要满足 $\sum_i \sum_k R_{ik} \leq R_{\text{total}}$. 在分配过程中, 智能体根据自身的认知状态和能力不断调整对不同子任务的胜任度评估, 以实现资源的最优配置. 例如如果智能体发现某个子任务的执行会导致资源过度消耗或与其他任务冲突, 基于其认知向量所反映的对系统状态的理解, 可能降低对该子任务的胜任度评估, 从而使任务分配更加合理.

4.7.3 动态调整与协作优化

任务分配不是一次性的静态过程, 而是在任务执行过程中根据实际情况动态调整. 智能体通过持续更新认知向量 $\mathbf{v}_i$, 实时监测任务执行进度和资源使用情况, 以及与其他智能体的协作效果, 对任务分配进行优化. 例如, 如果某个智能体在执行任务过程中发现自身资源剩余较多, 而其他智能体执行任务时遇到困难, 基于其认知向量对整体任务和其他智能体状态的了解, 可以主动承担更多的任务或调整任务分配策略, 以提高整个卫星集群的任务执行效率. 这种动态调整和协作优化过程依赖于认知向量 $\mathbf{v}_i$ 所提供的信息, 确保卫星集群能够在复杂多变的环境中灵活应对

任务, 实现高效的资源利用和任务完成.

4.8 迭代优化

构建全局认知状态矩阵, 将所有智能体的认知状态进行组合, 有

$$\text{全局向量 } \mathbf{V}(t) = [\mathbf{v}_1(t)^T, \mathbf{v}_2(t)^T, \dots, \mathbf{v}_m(t)^T]^T;$$

$$\text{全局更新 } \mathbf{V}(t+1) = \mathbf{M}\mathbf{V}(t) + \mathbf{G}\mathbf{T}.$$

其中, $\mathbf{M}$ 为全局更新矩阵, 包含各智能体的能力矩阵和权重系数, 反映整个智能体网络的拓扑结构和能力分布; $\mathbf{G}$ 为任务驱动矩阵, 包含各智能体的任务驱动系数 γ_i .

收敛条件分析: 根据矩阵理论, 如果矩阵 $\mathbf{M}$ 的谱半径 (最大特征值的模) 小于 1, 即 $\rho(\mathbf{M}) < 1$, 则迭代过程收敛. 为了证明算法中 $\rho(\mathbf{M}) < 1$, 需要考虑以下因素.

(1) 正定性: 能力矩阵 $\mathbf{A}_i$ 可逆, 且权重系数非负, $\mathbf{M}$ 的特征值实部为正.

(2) 归一性: 权重系数满足归一化条件, 限制了 $\mathbf{M}$ 的谱半径.

(3) 有限域特性: 在有限域上运算, 矩阵的特征值也属于有限域元素, 取值范围受限, 综合上述因素, 可以证明算法的收敛性.

4.9 算法特性

算法对通信延迟和数据丢包具有一定的容忍度. 由于更新规则是基于局部信息的线性组合, 即使部分信息缺失, 智能体仍可进行更新. 算法的计算和通信开销较低, 适合在动态环境中快速响应. 算法复杂度与智能体数量和网络平均度线性相关, 适用于大规模卫星集群.

5 基于能力与认知模型的卫星集群能力发布订购机制

在构建卫星集群的能力与认知模型、能力视图、自主任务分配算法的基础上, 为实现卫星集群资源的高效管理和用户需求的有效满足, 构建基于能力视图的卫星能力发布订购机制至关重要. 该机制将进一步完善功能架构, 通过能力视图为用户提供直观的资源信息显示, 并建立有效的发布订购机制, 实现卫星资源与用户需求之间的精准对接.

5.1 发布订购机制的流程设计

基于能力视图的卫星能力发布订购机制, 旨在实

现卫星集群能力信息的可视化显示、动态发布以及用户对卫星资源的灵活订购与管理. 在发布与订购机制中, 能力视图作为关键显示界面, 整合了卫星集群的多种能力信息, 包括观测能力、通信能力等, 并以直观、易懂的方式呈现给用户. 通过能力视图, 用户可以快速了解卫星集群在不同区域、不同时间段的能力分布情况, 为资源订购提供有力的决策支持.

发布与订购机制主要包括卫星端和用户端两部分, 卫星端负责采集、处理和发布卫星的能力信息, 以及接收和执行用户的订购请求; 用户端则为用户提供直观的能力视图显示和交互订购界面, 使用户能够方便地查看卫星能力状态并进行资源订购. 基于能力视图的卫星能力发布订购机制的总体流程如图 6 所示.

5.2 发布流程的实现

5.2.1 能力视图的动态更新

能力视图具备动态更新能力, 能够实时反映卫星集群的能力状态变化. 卫星端持续监测卫星的运行状态、载荷工作情况以及任务执行进度等信息, 一旦这些信息发生变化, 立即更新能力视图相关数据. 例如当一颗卫星的观测设备出现故障时, 能力视图中该卫星对应区域的观测能力标识将相应改变, 提醒用户该区域的观测能力受到影响. 同时, 对于任务执行过程中的资源占用情况, 能力视图也能实时更新, 确保用

户获取的信息始终准确有效.

5.2.2 资源发布流程

卫星端按照一定的时间间隔或事件触发条件, 将卫星集群的能力信息进行整合和处理, 生成能力视图相关数据, 并通过通信链路向用户端发布. 在发布过程中, 采用高效的数据传输协议和加密技术, 确保能力信息的安全、快速传输. 同时, 为了适应不同用户端设备的兼容性, 发布的数据格式采用通用且易于解析的格式, 例如 JSON 或 XML 格式. 发布的内容不仅包括能力视图的基本图形数据, 还包含详细的能力参数、资源状态以及任务执行信息等, 使用户能够全面了解卫星集群的能力状况.

5.3 订购流程的实现

用户通过用户端的交互界面查看能力视图, 根据自身需求选择所需卫星资源, 并提交订购请求, 如图 7 所示. 订购请求中包含用户的身份信息、所需资源的类型、数量、时间范围以及优先级等关键信息. 用户端在接收到用户的订购请求后, 首先对请求进行合法性和有效性检查, 例如检查用户权限是否足够、订购资源是否在可提供范围内等. 确认无误后, 将订购请求发送至卫星端. 卫星端接收到请求后, 考虑当前任务分配情况、资源剩余量以及资源约束条件等因素, 再次进行资源可用性检查, 如果资源满足订购需求, 卫星端将生成任务计划, 分配相应的卫星资源, 并将订购确认信息返回给用户端; 如果资源不足或无法满足需求, 卫星端将向用户端反馈拒绝订购的原因, 用户可以根据反馈信息调整订购请求或选择其他资源.

通过构建基于能力视图的卫星能力发布订购机制, 实现了卫星集群资源与用户需求之间的高效交互与管理, 进一步提升了卫星集群的整体效能. 接下来, 将结合在轨验证实验, 对整套方法的实际运行效果进行全面评估.

6 自主任务分配算法与能力发布订购机制的在轨验证实验

为验证卫星集群自主任务分配算法以及能力发布订购机制在实际应用中的有效性与实用性, 在齐鲁一号上开展在轨验证实验. 该实验用于验证卫星集群的能力与认知模型、能力视图、自主任务分配算法、

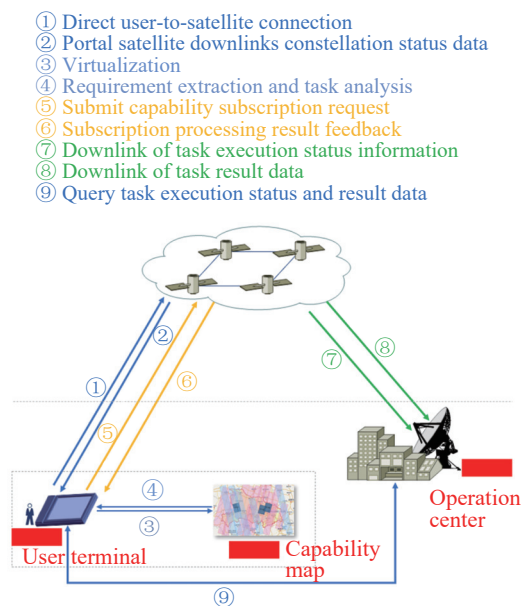


图 6 发布订购机制总体流程

Fig. 6 Overall process of the publish-subscribe mechanism

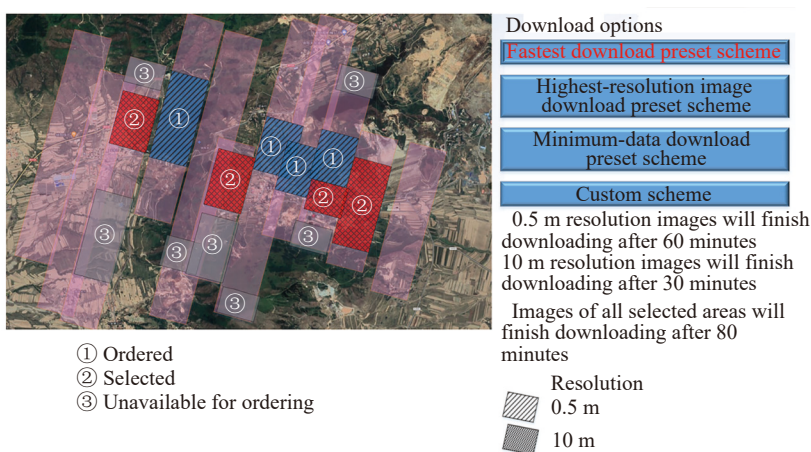


图 7 资源约束检查及订购方案计算

Fig. 7 Resource constraint check and subscription scheme calculation.

能力发布订购服务流程在实际环境中的可行性和有效性.

6.1 实验配置与设置

在轨验证实验依托高性能硬件平台, 确保模型和算法能够在复杂的空间环境中稳定运行. 主控 FPGA 选型为 XC7 Z045-2 FF676 I, 其集成的双核 ARM Cortex-A9 处理系统 (Programmable System, PS) 工作频率高达 800 MHz, 具备强大的计算能力. L1 指令缓冲区和数据缓冲区各 32 KB, L2 缓冲区 512 KB, 为算法运行提供了充足的内存资源. 芯片还配备了丰富的外设接口, 包括片上存储器、外部存储器接口等, 便于数据存储和交互. 此外, 硬件平台包含 2 片单片 64 MB 的 QSPI FLASH、512 MB(16 bit) 的 PS DDR3 内存、4 GB 的 SD 卡以及 1 路单 SSD 容量 1 TB 的 SATA 接口, 为星上数据处理、存储和传输提供了坚实保障. 整个硬件系统质量等级为 I 级, 能够适应 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的恶劣工作温度范围, 确保在空间环境下稳定可靠运行. 芯片及外围主要硬件配置见表 2.

软件环境的搭建同样重要, 其为算法的高效执行提供了必要的支持. 实验采用 PetaLinux v2015.4 作为操作系统, 为星上软件提供了稳定的运行环境. 中间件选用 zmq (ZeroMQ 4.2.1) 和 czmq, 确保高效的 消息传递和通信. 数据库采用 sqlite3, 用于存储卫星 状态信息、任务列表等关键数据. 使用 Xilinx SDK 2015.4 作为软件开发工具包 (SDK), 配合 log4 cplus (1.2.1 - rc1) 日志库, 方便进行软件的开发、调试和日 志记录. 开发语言为 C++, 利用 Xilinx Software De-

表 2 在轨实验硬件环境

Table 2 On orbit experiment hardware environment

类别	参数
CPU	Cortex-A9双核, 主频800 MHz
QSPI FLASH	2片, 单片64 MB
PS DDR3	512 MB, 16 bit
SD	4 GB
SATA	1路, 单SSD容量 1 TByte

velopment Kit Release Version: 2015.4 作为开发环 境, 充分发挥硬件平台的性能优势, 实现自主任务分 配算法的各项功能. 自组织任务分配算法在轨验证实 验星上软件环境参数列于表 3.

6.2 实验算法及流程

在轨试验进行验证的算法及技术流程包含三个 方面.

6.2.1 卫星资源能力与认知模型构建

针对多类型、异构卫星的统一管理和协同应用需 求, 构建全面且灵活的卫星资源能力模型. 该模型涵 盖多种卫星载荷, 包括获取载荷 (SAR、宽幅光学、红 外和可见光等)、计算载荷 (例如目标检测、目标识 别、水体范围计算、图像压缩等 9 项计算任务) 以及 传输载荷 (微波载荷、激光载荷、与用户终端通信的 小型天线等). 通过引入有限域线性群的代数结构, 将 卫星集群的能力与认知状态精确映射为数学上的矩 阵和向量, 构建卫星的认知模型. 在这一模型中, 能力 矩阵 A_i 反映了卫星智能体不同能力之间的内在关联

和转换关系, 其元素 a_{jk} 表示卫星在能力 j 上对能力 k 的影响或转换能力. 认知向量 v_i 则实时表征卫星智能体对任务和自身能力的认知程度, 其更新机制确保卫星能够根据自身能力、邻居信息和任务不断调整认知状态. 这种基于有限域线性群的建模方式, 使得卫星能够在动态的空间环境中, 准确地对自身能力和任务进行动态的认知更新, 确保智能体间信息交换和协同决策的准确性和一致性, 为后续的任务分配提供了坚实的理论基础.

6.2.2 在轨自主任务分配算法

设计并验证适用于复杂动态环境下大规模卫星集群的自主任务分配算法. 该算法基于前面构建的能力与认知模型, 充分考虑智能体自身能力、邻居影响和任务驱动三方面因素, 实现卫星智能体对任务的自主匹配和决策. 在多用户、多任务的复杂场景下, 主星负责保存需求缓冲队列和任务列表, 并采用序贯决策在轨进行优先级需求即时规划. 算法支持任务的灵活插入、删除和更新操作, 确保能够及时响应动态变化的用户需求, 提供即时信息服务. 在任务分配过程中, 卫星智能体首先根据自身能力向量 c_i 和任务向量 T 计算匹配度, 当匹配度超过预设阈值时, 智能体决定参与任务. 随后, 根据认知状态和能力, 进一步细化任务分配. 通过这种方式, 算法实现了卫星集群在复杂环境下的高效协同和任务合理分配.

6.2.3 能力视图发布订购服务流程验证

集群内状态同步. 集群内主星发起状态一致性过程, 将集群内所有从星的位置信息、资源状态信息和任务列表等最新状态信息, 同步至主星. 这一步骤确保主星掌握整个卫星集群的实时状态, 为后续能力视

图的准确生成和资源合理分配提供基础数据.

终端能力视图发布. 用户终端登录后, 集群主星将存储的集群内卫星的位置信息、资源状态信息和任务列表等信息下传给用户终端. 终端接收到数据后, 根据预定的算法和格式生成能力视图, 呈现给用户. 能力视图包含观测能力视图和传输能力视图等, 用户可以通过观测能力视图查看卫星集群对于特定区域在一定时间段内的获取能力, 包括遥测频段、图像分辨率等信息, 了解指定区域上未来某段时间内卫星集群对该区域的观测频度、观测强度、观测精度. 传输能力视图则用于描述特定时刻两个端点间通过卫星互联网链路进行数据传输的能力, 用户可以借此了解未来某段时间感兴趣两个端点间的传输能力状况, 或者预定未来某段时间的某条链路带宽. 终端能力视图发布过程如图 8 所示.

用户能力订购. 用户通过终端对能力视图进行交互订购. 用户点选能力后, 终端系统通过约束算法模型对用户点选的资源进行交互检测, 将不再可用的能力取消. 例如在观测能力视图中, 如果用户选择了某一区域某时间段的观测资源, 但该资源在当前任务分配或资源约束下不可用, 系统将自动将其标记为不可选. 当用户需求确认后, 将需求上传至星上系统.

订购确认/在轨智能规划. 从星收到用户需求后, 向主星转发该需求. 主星接收到用户需求后, 通过卫星集群自主任务分配算法, 生成多星任务规划方案, 并通过该用户终端的接入星, 将订购确认消息发给用户终端. 在这个过程中, 自主任务分配算法充分考虑卫星集群的资源状况、用户需求以及任务优先级, 确保任务分配的合理性和高效性.

表 3 在轨实验软件环境

Table 3 On orbit experiment software environment

类别	参数
芯片型号	Xilinx-zynq 7045
操作系统	PetaLinux v2015.4
中间件	zmq (ZeroMQ 4.2.1), czmq
数据库	sqlite3
SDK	SDK: Xilinx SDK 2015.4
日志库	log4 cplus, 1.2.1-rc1
开发语言	C++
开发环境	Xilinx Software Development Kit Release Version: 2015.4

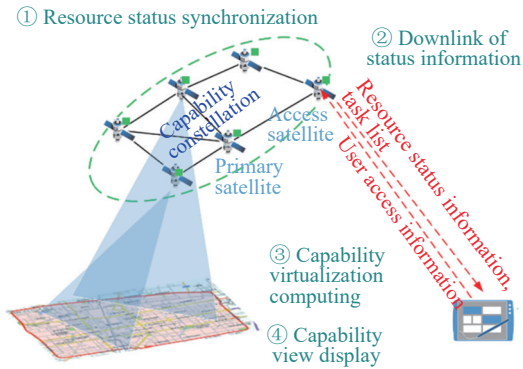


图 8 终端能力视图发布过程
Fig. 8 Terminal capability view publishing process

规划方案分发. 主星在规划方案生成后, 将任务列表发送到各从星, 各从星生成本星的任务列表, 并返回确认信息. 从星根据任务列表执行相应任务, 同时持续更新自身状态信息, 并反馈给主星, 实现整个卫星集群任务执行的闭环管理.

用户终端能力订购流程如图 9 所示.

6.3 在轨验证试验结果

6.3.1 时间指标分析

卫星集群能力在轨组织软件各项时间指标清晰反映了算法的性能表现 (见表 4). 基础计算时间为 78.995 s, 在此期间算法完成了复杂的矩阵运算、向量更新以及需求评估等核心计算任务. 能力发布时间在单颗卫星处理 4 个覆盖条带时表现优异, 小于 1 s 即可完成, 这得益于认知模型对卫星能力的高效组织和快速更新机制, 以及能力视图发布流程的优化. 能力视图约束检查时间同样小于 1 s, 确保了能力视图生

成的准确性和及时性, 有效避免了用户订购不可用资源. 在轨冲突决策时间在单星执行两个任务 (观测、处理) 时仅需 9 ms, 体现了算法在处理任务冲突时的高效性, 能够迅速做出合理决策, 避免任务冲突对整体任务执行的影响. 规划方案数据帧生成时间小于 3 s, 保证了任务规划的快速生成和及时下达, 使卫星能够及时响应用户需求. 能力订购响应时间 (带天地链路通信时间) 为 31 s, 尽管包含天地链路通信环节, 但仍在可接受范围内, 表明模型、算法和发布订购机制在天地一体化的任务流程中能够有效地协调资源, 及时响应用户的订购需求.

6.3.2 星上遥测参数分析

星上遥测参数 (见表 5) 为算法在轨运行提供了实时的状态监测数据. 通过对遥测参数的分析, 可以深入了解卫星在任务执行过程中的各种状态信息, 例如任务类型、任务来源、任务执行星、任务编号、任务起始时间、任务时长等. 这些参数不仅有助于实时监控任务执行进度, 还为算法的性能评估和优化提供了重要依据. 例如, 通过分析任务执行时长的变化趋势, 可以评估算法在不同任务场景下的效率; 根据任务来源和执行星的信息, 可以了解任务分配的合理性和卫星资源的利用情况. 综合各项时间指标和遥测参数, 可以得出结论: 基于有限域线性群的卫星集群能力与认知模型、能力视图、自主任务分配算法、发布订购机制在轨验证实验表现出色, 有效地实现了卫星集群的任务分配和协同工作, 充分体现了模型和算法在提升任务分配效率、优化资源利用和增强系统鲁棒性方面的显著效果. 与传统任务分配方法相比, 本方法在处理复杂动态任务时具有明显优势, 能够在短时间内计算出高质量的任务分配方案, 并且在面对通信延迟、数据丢包等实际问题时保持了稳定的性能, 有力地推动了卫星集群自主化技术的发展.

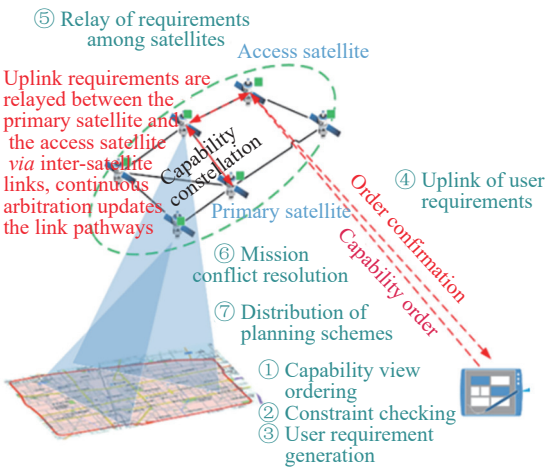


图 9 用户终端能力订购流程
Fig. 9 User terminal capability subscription process

表 4 在轨实验时间指标
Table 4 On orbit experiment time evaluation index

类别	参数
基础计算时间	78.995 s
能力发布时间	单颗卫星, 4个覆盖条带, <1 s
能力视图约束检查时间	<1 s
在轨冲突决策时间	单星两个任务(观测、处理) 9 ms
规划方案数据帧生成时间	<3 s
能力订购响应时间 (带天地链路通信时间)	31 s

7 结论

针对大规模卫星集群在复杂动态环境下执行任

表 5 在轨试验遥测参数
Table 5 On orbit experiment telemetry parameters

英文名	中文名	物理量	源码(16进制)
RW10	当前任务状态	0000	0000
RW11	下一任务类型	1 a (Sar观测-处理)	1 a
RW12	下一任务来源	Aa (星上)	aa
RW13	下一任务执行星	C2 (A星)	C2
RW14	下一任务编号	11	000b
RW15	下一任务起始时间	2021-06-22 15:26:12.0000	11d25f14
RW16	下一任务时长	11	0000000b
RW17	当前任务编号	0	00000000

务时面临的资源管理调配困难、任务规划管理复杂以及传统任务分配方法实时性与鲁棒性不足等问题,提出了一种基于有限域线性群的卫星集群能力与认知模型构建方法,以及能力视图与发布订购机制解决方案,整体构成了一种新的卫星资源与用户需求匹配的方法,实现了卫星集群资源的高效管理和任务的合理分配。

通过引入有限域和线性群的代数理论,构建卫星集群的能力与认知模型,将能力映射为有限域上的矩阵,将认知状态映射为向量,利用有限域线性群的封闭性、可逆性等特性,确保智能体间信息交换和协同决策的准确与一致,为后续任务分配奠定坚实基础。

构建基于能力与认知模型的卫星集群能力视图,设计了能力数据的组织处理方式,及可视化问题的解决方案,通过观测和传输能力视图的可视化显示方式,为用户提供了直观的卫星集群能力显示,能力视图支持多用户多优先级模式,提高了资源分配合理性及效率,便于资源订购和管理。

基于能力与认知模型设计的自主任务分配算法,综合考虑了智能体自身能力、邻居影响和任务驱动因素,使卫星集群在复杂环境下通过交互和迭代更新实现了任务的自主匹配与决策。该算法在有限域运行,具有良好的收敛性和鲁棒性,适用于大规模卫星集群。

构建的基于能力视图的卫星集群能力发布订购机制,实现了发布和订购的整体流程,完成了卫星集群资源与用户需求之间的高效交互与管理,进一步提升了卫星集群的整体效能。

在轨验证实验依托高性能硬件和软件平台,对卫星资源能力与认知模型、自主任务分配算法及能力视

图发布订购服务流程进行了流程验证。实验结果表明,本方法各项时间指标表现优异,星上遥测参数也证明该方法能有效实现任务分配和协同工作,与 traditional 方法相比优势明显,有力推动了卫星集群自主化技术发展。

综上所述,本文构建的新的卫星资源与用户需求匹配的方法,在理论和实践上均具有可行性和有效性,可为未来大规模卫星集群执行复杂任务提供有效支持,有望在航天领域发挥重要作用。

参考文献

[1] ZOU Run, LIU Yang, ZANG Qing, *et al.* A review of the development of foreign space-based space target surveillance systems[J]. *Spacecraft Engineering*, 2023, **32**(05): 110-118 (邹润, 刘阳, 臧晴, 魏斌斌, 刘春恒, 侯进永, 周宇翔. 国外天基空间目标监视系统发展综述 [J]. 航天器工程, 2023, **32**(05): 110-118)

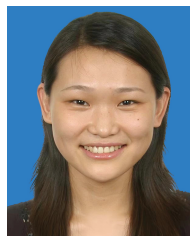
[2] WEI Wenting, FU Liying, WANG Kun, *et al.* A review of satellite Internet routing technologies[J]. *Journal of Xidian University*, 1-15 (魏雯婷, 伏丽莹, 王琨, 卢雪玉, 周兆军. 卫星互联网路由技术综述 [J]. 西安电子科技大学学报, 1-15)

[3] WANG Zhenlang, HE Huiqun, ZHOU Jun, *et al.* Multi-satellite observation task allocation method based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Shanghai Aerospace*, 2024, **41**(01): 108-115 (in Chinese and English) (王桢朗, 何慧群, 周军, 金云飞. 基于多智能体深度强化学习的多星观测任务分配方法 [J]. 上海航天 (中英文), 2024, **41**(01): 108-115)

[4] LEI Yonggang, ZHANG Ruoyu, MA Jianan. Application of artificial intelligence technology in the field of satellite mission control[J]. *Telecommunication Engineering*, 2022, **62**(09): 1377-1382 (雷永刚, 张若禹, 马佳楠. 人工智能技术在卫星任务管控领域的应用 [J]. 电讯技术, 2022, **62**(09): 1377-1382)

- [5] ZHANG Xudong, LI Shaobo, LI Chuanjiang, *et al.* A review of unmanned aerial vehicle swarms: technologies, challenges and the future[J]. *Radio Engineering*, 2023, **53**(07): 1487-1501 (张旭东, 李少波, 李传江, 张安思, 杨磊. 无人机集群综述: 技术、挑战与未来 [J]. 无线电工程, 2023, **53**(07): 1487-1501)
- [6] LI Huan. Research on task-driven unmanned aerial vehicle ad hoc network[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2023 (李欢. 面向任务驱动的无人机自组织网络研究 [D]. 电子科技大学, 2023)
- [7] ZHAI Sheping, CAO Yongqiang, YANG Rui, *et al.* Byzantine fault-tolerant consensus algorithm supporting dynamic feedback decision-making[J]. *Journal of Xidian University*, 1-16 (翟社平, 曹永强, 杨锐, 张瑞婷. 支持动态反馈决策的拜占庭容错共识算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 1-16)
- [8] TAN Shaolin, GU Haibo, LIU Kexin. Distributed learning in multi-agent games: principles and algorithms[J]. *Journal of Command and Control*, 2024, **10**(02): 127-136 (谭少林, 谷海波, 刘克新. 多智能体博弈中的分布式学习: 原理与算法 [J]. 指挥与控制学报, 2024, **10**(02): 127-136)
- [9] BIAN Yujing. Research on satellite time-domain resource allocation scheme for multi-tasks[D]. Nanjing University of Information Science & Technology, 2023 (卞雨靖. 面向多任务的卫星时域资源分配方案研究 [D]. 南京信息工程大学, 2023.)
- [10] CHEN Xu, HE Ping, LUO Meng, WU Han. Consistency of multi-agent systems with state constraints under event triggering[J]. *Journal of Yibin University*, 1-12 (陈旭, 何平, 罗萌, 吴汉. 事件触发下状态约束的多智能体系统一致性 [J]. 宜宾学院学报, 1-12)
- [11] CHEN Yu, ZHANG Yong, CHEN Shi. Adaptive weighted clustering algorithm for large-scale satellite cluster networks[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2021, **41**(11): 1188-1192 (陈宇, 张勇, 陈实. 大规模卫星集群网络自适应加权分簇算法 [J]. 北京理工大学学报, 2021, **41**(11): 1188-1192)
- [12] ZHU Zhengyuan. A property of linear groups and the orders of their subgroups[J]. *Journal of Beijing Union University*, 1995(03): 27-30 (朱正元. 线性群及其子群阶的一种性质 [J]. 北京联合大学学报, 1995(03): 27-30)

作者简介



李英玉 女, 1976年11月出生于河北省迁安市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间信息组织、复杂系统仿真等。
E-mail: gsr0309@163.com



孟新 (通信作者) 男, 1965年生于新疆, 达斡尔族, 祖籍内蒙古自治区呼伦贝尔莫力达瓦达斡尔自治旗. 研究员, 博士生导师. 研究领域为空间任务仿真与分析评估技术、空间信息处理与模拟技术、卫星组网技术、航天任务地面系统技术。
E-mail: sushi@cust.edu.cn