博弈协商策略下的多星分布式协同任务规划

刘立吴1[†], 董正宏², 苏昊翔¹, 陈公政¹

(1. 航天工程大学研究生院,北京 101400; 2. 航天工程大学科研学术处,北京 101400)

摘要:随着星载智能水平、航天运载能力、星间通信能力的全面提升,智能化、组网化、自治化的卫星系统成为当 前发展趋势,传统的集中管控方式已难以适应未来分布式卫星系统的综合管理需求.针对分布式遥感卫星系统任务 规划问题,本文提出了一种博弈协商机制的多星自主分布式任务规划模型.在该模型中,每颗卫星作为"理性"个体 参与任务规划,在每轮博弈中基于局部目标信息和全局交互信息,利用自适应粒子群优化算法不断更新自身的"行 动",直至达到系统平衡.仿真结果显示,分布式任务规划方法能够灵活地应对不同规模的问题场景,算法性能不会 随着问题规模的增大而出现显著的下降,有效地克服了传统方法在大规模任务规划场景中优化时间激增、收敛速 度慢等缺点,能高效地获取全局性能较优的规划解.

关键词: 卫星; 分布式系统; 任务规划; 博弈; 优化算法

引用格式: 刘立昊, 董正宏, 苏昊翔, 等. 博弈协商策略下的多星分布式协同任务规划. 控制理论与应用, 2023, 40(3): 502 – 508

DOI: 10.7641/CTA.2021.10340

Multi-satellite distributed mission scheduling via game strategy

LIU Li-hao^{1†}, DONG Zheng-hong², SU Hao-xiang¹, CHEN Gong-zheng¹

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101400, China;

2. Research and Academic Office, Space Engineering University, Beijing 101400, China)

Abstract: With the advancement of on-board intelligence, space carrying capacity, and inter-satellite communication capabilities, intelligent, networked and autonomous satellite systems have become the current development trend, and traditional centralized management and control methods are difficult to adapt to the integrated management needs of future distributed satellite systems. Aiming at the missions scheduling of distributed remote sensing satellite systems, this paper proposes a distributed mission planning model for remote sensing satellites based on the game theory. In this model, each satellite participates in mission planning as a "rational" player. In each round of the game, based on the local target information and the global interactive information, the adaptive particle swarm optimization algorithm is used to continuously update player's own "action" until the system balance is reached. The simulation results show that the distributed missions scheduling method can flexibly deal with problem scenarios of different scales, and the performance of the algorithm will not decrease significantly with the increase of the problem scale, and can efficiently obtain the global optimal solution.

Key words: satellite; distributed system; mission scheduling; game theory; optimization algorithm

Citation: LIU Lihao, DONG Zhenghong, SU Haoxiang, et al. Multi-satellite distributed mission scheduling via game strategy. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(3): 502 – 508

1 引言

对地观测卫星作为航天器中重要的一支,在空间 信息应用中发挥重要的作用.随着技术应用的不断深 入,单颗卫星已经逐渐无法满足用户日益复杂的需求, 大量搭载光学、微波等异构载荷的对地观测卫星被送 入太空进行组网、构建分布式对地观测卫星系统.受 制于星载计算机的计算能力和星间通信能力,传统的 卫星任务规划研究主要是围绕集中式任务规划技术 展开,卫星的任务编排主要由地面管控中心统一调度 完成.这种规划方式使得卫星极度依赖地面控制,卫 星被赋予的自主规划能力十分有限.随着火箭运载技 术的持续突破,在轨星座的规模逐渐扩大;受益于星 间激光通信技术持续进步,星载智能水平的提升,人 们对卫星系统的网络化、智能化、自治化建设愈发关

收稿日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-10-09.

[†]通信作者. E-mail: liulihao070204@163.com; Tel.: +86 15010315489. 本文责任编委: 王龙.

国家自然科学基金项目(61602516)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61602516).

注,单星的系统局限性日益凸显,分布式卫星系统逐渐成为主流.以航天资源利用最大化及用户需求满足最大化为目的,研究对多星自主分布式任务规划方法,减少卫星对地面集中管控的压力,对提升卫星智能水平和综合应用能力具有重要意义.

卫星任务规划与调度是一个目标导向的多约束、 多冲突的组合优化问题,这类问题很难通过明确流程 的数学方法得到最优解,往往只能通过优化算法在构 建的数学约束模型下对全局解空间进行搜索,在可接 受的时间成本下得到较优解.由于各类卫星的工作流 程和运行方式差异较大,卫星任务规划模型难以具备 可移植性,研究人员会根据关注重点设置包括观测窗 口、卫星载荷、卫星能量等要素在内的约束条件,设计 相应的模型架构.就当前国内外研究文献而言,卫星 任务规划规划模型大致包括整数规划模型^[1]、基于图 论的模型^[2]、约束满足问题模型^[3]等在内的集中式规 划架构,和基于多智能体的规划模型^[4-5]、基于合同网 的任务规划模型^[6]等在内的分布式规划架构.

在模型求解算法研究中,由于卫星任务规划问题 具有非确定性多项式--难(NP-Hard)的特性,相关领域 学者都趋向于利用智能优化算法对问题进行求解.这 类算法在求解多资源、复杂约束条件的大规模优化问 题中取得了一定成效,但由于算法本身的结构特性, 单一的算法在求解过程中在收敛速度、全局最优等性 能上普遍存在缺陷,研究人员需结合具体问题设置启 发信息,在算法编码、选择策略、优化算子、参数设 计、算法结合等方面进行改进,以期达到更优的性能. 在卫星任务规划领域,当前运用较广泛的智能算法包 括蚁群算法^[7]、模拟退火算法^[8]、遗传算法^[9]、禁忌搜 索算法等[10].

为了提升对地观测卫星系统自主规划能力,减少 由于集中规划而带来的计算时间长、资源耗费高、速 度响应慢等问题.针对对地观测异构多星任务规划问 题,本文在考虑了包括光照、侧摆、能源、固存等对地 观测卫星资源约束条件下,将每颗卫星视为一个具备 理性决策能力的智能体,利用博弈相关理论提出了一 种多星分布式自主任务规划模型,设计了合理的优化 目标、详尽的约束规则和算法求解策略,并在文末进 行了仿真校验与分析,对本文所提方法的科学性和有 效性进行了验证.

2 模型构建

2.1 问题描述和基本思路

对地观测卫星的主要任务是利用多种类型的任务 载荷(可见光/红外相机、光谱扫描仪、合成孔径雷达 等)对地面目标进行遥感探测,并将获取的数据传至用 户.由于卫星对地观测活动受到卫星轨道、载荷参数、 平台机动等因素的影响,卫星对区域的访问带有周期 特性,在同一时刻只能观测有限区域.一旦卫星数量 提升,用户观测需求增多,多卫星的任务规划的优化 空间即呈爆炸性增长.为了充分利用卫星资源,在有 限的时间内快速决策获得最大的应用效能,必须要结 合用户需求对卫星资源进行统筹,明确每颗卫星在什 么时间用什么载荷对地面的哪些目标开展观测活动. 与传统的地面集中式规划思路不同,本文将每颗卫星 视为具备"理性决策"能力的个体,利用局部信息参与 全局博弈,通过多轮交互迭代,以达到当前博弈中的 "纳什均衡"为终止条件,最终给出一个全局较优的 方案,如图1所示.





2.2 符号定义与约束条件

为了方便描述,首先给出本文模型所涉及的相关符号参数,如表1所示.

2.3 基本假设

结合实际卫星系统实际,对本文涉及的多星任务 规划问题做出以下合理简化和基本假设.

1) 本文涉及的观测任务是指卫星利用不同类型

的有效载荷对地面点目标的观测,一个目标只需被观测一次.

2) 单颗卫星只携带一种有效载荷,本文考虑可见 光和合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)两 种类型载荷,且在任一时刻只执行一个任务,任务一 旦开始,不考虑中断的情况.

3) 每颗卫星均具备计算处理能力,且卫星之间存

在实时的通信链路,可满足任意时刻相互通信、信息 传输的需求. 4) 不考虑卫星机动变轨的情况.

5) 不考虑天气、云层对任务规划的影响.

表1 符号参数列表

 Table 1
 Parameters and label definitions

符号	定义
$S = \{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$	S代表卫星集, n代表卫星的数量
$T = \{t_1, t_2, \cdots, t_m\}$	T代表目标集,m代表目标的数量
$\mathbf{Pow} = \{\mathbf{pow}_1, \mathbf{pow}_2, \cdots, \mathbf{pow}_i\}$	Pow代表卫星的能量集, i代表卫星编号
$\mathrm{Sto} = {\mathrm{sto}_1, \mathrm{sto}_2, \cdots, \mathrm{sto}_i}$	Sto代表卫星固存容量集, i代表卫星编号
$SA = \{s\alpha_1^1, s\alpha_1^2, \cdots, s\alpha_i^j\}$	SA代表卫星侧摆角集,i代表卫星编号,j代表执行的任务编号
Sas_i	Sas _i 表卫星i执行任务切换时单位时间内侧摆角度变化大小
$\operatorname{Prio}=\{\operatorname{prio}_1,\operatorname{prio}_2,\cdots,\operatorname{prio}_m\}$	Prio代表目标优先级集,m代表目标编号
$W = \{w^1, w^2, \cdots, w^k\}$	W代表观测窗口集, k代表窗口的数量. $w^k = [wbt^k wet^k wdt^k], w^k$ 代表第k个窗口的时间 信息, wbt ^k 代表开始时间, wet ^k 代表结束时间, wdt ^k 代表持续时间
$\mathrm{St} = \{\mathrm{st}^1, \mathrm{st}^2, \cdots, \mathrm{st}^m\}$	St代表卫星执行任务的时间集, m代表任务数量
$\mathrm{st}_i^j = [\mathrm{sbt}_i^j \; \mathrm{set}_i^j]$	$\operatorname{st}_{i}^{j}$ 代表第 i 颗卫星执行第 j 个任务的时间信息, $\operatorname{sbt}_{i}^{j}$ 代表规划后卫星执行任务的开始时间, $\operatorname{set}_{i}^{j}$ 代表结束时间
Num	Num = { $num_1, num_2, \dots, num_i$ }, Num代表卫星执行的任务数量集, <i>i</i> 代表卫星编号
P_i^j	P_i^j 表示卫星 i 执行任务 j 单次消耗的能量
Ps_i	Ps_i 表卫星 i 任务切换单位时间消耗能量
Pt_i	Pt_i 表卫星 i 执行观测单位时间消耗能量
Dur_i^j	Dur_i^j 代表卫星 i 执行任务 j 时的持续时间
Pre_i^j	Pre_i^j 代表卫星 i 执行任务 j 时由上一个任务切换过来需要的载荷准备时间
X_i^j	X_i^j 代表卫星观测目标的决策变量, j 代表对应的目标编号, i 表示对应的卫星的编号, 1 表示目标 j 已被卫星 i 观测, 0 表示未被观测
D_i^j	D_i^j 代表卫星 i 执行任务 j 时单次消耗的固存容量

2.4 模型约束

在上述符号参数及基本假设的基础上,本文考虑 的约束条件包括:

1) 可见窗口约束.卫星有效载荷与目标之间必须 可见,窗口持续时间必须不小于任务观测时间.

$$\begin{cases} \forall i \in n, \ j \in m, \operatorname{st}_{i}^{j} \in \operatorname{St}, \ \exists w^{k} \in W, \\ \operatorname{sbt}_{i}^{j} \geqslant \operatorname{wbt}^{k}, \ \operatorname{set}_{i}^{j} \leqslant \operatorname{wet}^{k}, \ \operatorname{Dur}_{i}^{j} \leqslant \operatorname{wdt}^{k}. \end{cases}$$
(1)

2) 侧摆角约束. 卫星进行任务切换时, 侧摆角度 不能超出最大侧摆能力.

$$\forall i \in n, \ j \in m, \ \mathrm{sa}_i^j \leq \max(\mathrm{sa}_i).$$
 (2)

3) 任务准备时间约束.两个任务间的间隔时间 (上一个任务结束到下一个任务开始的时间间隔)必须 要不小于载荷准备时间.

$$\begin{cases} \forall i \in n, \ j \in m, \operatorname{st}_{i}^{j}, \ \operatorname{st}_{i}^{j+1} \in \operatorname{St}, \\ \operatorname{sbt}_{i}^{j+1} - \operatorname{set}_{i}^{j} \ge \operatorname{Pre}_{i}^{j+1}, \\ \operatorname{Pre}_{i}^{j+1} = (\operatorname{sa}_{i}^{j+1} - \operatorname{sa}_{i}^{j})/\operatorname{Sas}_{i}. \end{cases}$$
(3)

4) 能量约束. 单颗卫星执行任务消耗的能量累积 不能超过本卫星的能量存储上限.

$$\begin{cases} \forall i \in n, \ j \in m, \ \sum_{j=1}^{\text{num}_i} P_i^j \leqslant \text{Pow}_i, \\ P_i^j = (\text{set}_i^j - \text{sbt}_i^j)^* \text{Pt}_i + \text{Pre}_i^{j*} \text{Ps}_i. \end{cases}$$
(4)

5) 固存约束. 单颗卫星执行任务消耗的固存累积 不能超过本卫星的固存存储上限.

$$\forall i \in n, \ j \in m, \ \sum_{j=1}^{\operatorname{num}_i} D_i^j \leqslant \operatorname{sto}_i.$$
 (5)

6) 光照约束.本文主要考虑可见光相机和合成孔径雷达两种载荷,其中SAR可以在全轨道周期内观测,可见光相机只能在一定的太阳高度角(SunAng)内进行观测,太阳高度角需要满足下式.

$$\forall l \in k, i \in n, \operatorname{Sun}(l) \ge \operatorname{SunAng}_i.$$
 (6)

7) 载荷类型约束. 目标必须要被需求类型(Req) 的载荷(Payl)观测.

$$\forall i \in n, j \in m, \operatorname{st}_{i}^{j} \in \operatorname{St}, \operatorname{Payl}_{i} = \operatorname{Req}_{i}.$$
 (7)

2.5 优化目标

本文期望通过规划,多颗卫星能够在优先保证观 测到高价值目标(高优先级)的基础上尽可能多地提升 目标观测的总数量,同时降低各卫星的能量消耗,因 此设定以下3个子目标.

1) 子目标1: 最大化观测目标优先级.

$$y_1 = a \cdot \operatorname{Max} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} X_i^j \cdot \operatorname{prio}^j.$$
(8)

2) 子目标2: 最大化目标观测数量.

$$y_2 = b \cdot \max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} X_i^j.$$
 (9)

3) 子目标3: 最小化能量消耗.

$$y_3 = c \cdot \operatorname{Min} \sum_{i=1}^n P_i.$$
(10)

由于优先级、任务执行数量和能量消耗的单位不同,无法同时直接评价,本文引入了量纲参数*a*,*b*,*c*对各指标进行统一,分别取值*a* = 1/4,*b* = 1,*c* = 1/5,以保证观测一个目标带来的收益一定高于能量消耗带来的损失.在上述3个子目标的基础上,总的优化目标通过权重线性求和的方法求得

$$y = \alpha \cdot y_1 + \beta \cdot y_2 + \gamma \cdot y_3, \tag{11}$$

其中 α , β 与 γ 为权重指标, 三者之和为1. 权重的大小 决定该子目标在总体优化目标的重要程度, 根据不同 的需求, 可设定不同的权值方案, 如: 将优先保证重要 目标作为首要因素, 可取值 $\alpha = 0.7$, $\beta = 0.2$, $\gamma = 0.1$.

3 基于博弈理论的分布式优化方法

3.1 博弈问题概述

为了在多星间实现高效的系统协同,本文将多星 任务规划视为一个博弈问题 $G = (N, \{A_i\}, \{U_i\}),$ 其 中N = S为博弈者集合,每一个卫星 s_i 都被视为一个 理性的博弈者,其理性体现在他会根据博弈过程中对 手采取的策略和信息交互不断调整自身行动策略 a_i , 从而使得自身收益 U_i 最大.此外, $A = \prod_i \in_N A_i$ 代表 整个系统在一轮博弈下采取的行动组合集,为了表达 的简明性, 令 $a_{-i} = (a_1, \cdots, a_{i-1}, a_{i+1}, \cdots, a_n)$ 代表 当前除去卫星 s_i 外,其他所有卫星的行动组合.

定义1(纳什均衡^[11]) 对于一个博弈问题 $G = (N, \{A_i\}, \{U_i\})$ 而言,对于任意博弈者 $i \in N$,称 a^* 为一个纳什均衡,当满足

$$U_i(a_i^*, a_{-i}^*) = \max_{a_i \in A_i} U_i(a_i, a_{-i}^*).$$
(12)

从纳什均衡的概念可以看出,在多星博弈中,每颗 卫星只能在不影响其他卫星的基础上,利用局部目标 函数改变自身的行动来趋于"最优"的规划方案.在一 次规划中,观测目标集合是一定的,卫星采取的行动 来源每轮博弈对观测目标的分配,因此卫星的行动间 是紧耦合的.当所有个体均无法通过改变自身的行动 来获取更大的整体收益时,则博弈达到了一个平衡状态.值得说明的是,在每轮博弈结束后,每颗卫星必须 要将自己的行动选择告知其他的卫星以保持认知的 一致性.本文在基本假设中提出各卫星能够通过星间 链路实时交互,为接下来基于纳什均衡的博弈寻优提 供了基础.

3.2 基于纳什均衡的分布式任务规划算法

为了使解决的问题更具有一般性,在分布式任务 规划算法中(算法伪代码如算法1所示),本文为每 个博弈个体 s_i 设置一个长度为L的记忆列表,并以 Mem $_i^t = (\text{mem}_1, \text{mem}_2, \cdots, \text{mem}_L)$ 来表示,每个记 忆列表初始状态为空.优化开始时,每个个体会被随 机分配若干个观测目标,并根据可见窗口情况产生相 应的行动集 A_i .在每轮博弈中,各个体的行动策略 $a_i \in A_i$,由部署于各星上的自适应粒子群算法(adaptive particle swarm optimization, APSO)同步产生,算 法将根据当前个体分配的目标进行单星任务规划,并 调用冲突消解算法进行约束检查,得到式(11)中的个 体当前收益和最佳回应策略BR $_i^t$

$$BR_i^t = \arg\max_{a_i^t \in A_i} U_i(a_i^t, a_{-i}^*).$$
(13)

个体将当前BR^{*i*}_{*i*}的收益与记忆列表中记录的上轮 行动的收益进行比较,遵循贪婪准则并最终选取收益 更高的行动作为当前轮次的行动*a^t*_{*i*}.在将*a^t*_{*i*}作为最新 的mem存储到记忆列表后,同分配过来但未被规划的 目标一起发送至其他卫星.应注意到,当记忆列表记 录的行动数量超过列表长度*L*后,列表会删除最靠前 的元素以保证固定长度的列表.按照上述流程,博弈 轮次不断推进,直至所有个体的记忆列表中当前记录 的行动均保持一致,这意味着:当前各星均无法通过 自身的方案调整获取更高的收益,此时终止博弈,输 出当前规划方案.

算法1 分布式任务规划算法

输入:卫星集*S*,目标集*T*,记忆列表长度*L*,观测窗口集*W* **输出:**总体规划方案

算法流程:

1. 对于每轮博弈, g = 1, 2, · · · , n, 执行**循环**

- 2. 对于每颗卫星 $s_i \in S$,同时执行**循环**
- 3. 接收来自相邻个体的决策信息;
- 4. 通过APSO算法计算并选择相应的 U_i 与BR^{*t*};
- 5. 挑选出当前个体分配到的但未被规划的目标;
- 将未被规划的目标信息和当前决策信息分别发送至相邻个体;
- 7. 更新每颗卫星 s_i 的记忆列表Mem $_i^t$;
- 8. 结束循环

9. 结束循环

3.3 单星粒子群优化算法

每轮博弈单星的优化结果都会对系统整体方案产 生影响,为了提升分布式优化算法的求解效率和最终 收益,需要各个体能够又快又好地输出各轮博弈方案. 本文设计了一种自适应粒子群规划算法, APSO的惯 性权重λ参数会随着迭代的演进自适应地调整, 使得 求解速度逐渐提升, 尽早收敛.

$$\lambda = \lambda_{\max} - \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot t}{T_{\max}}, \qquad (14)$$

其中: T_{max} 为最大迭代代数,t为当前迭代代数, λ_{min} 为最小惯性权重参数, λ_{max} 为最大惯性权重参数, APSO算法伪代码如算法2所示.

算法2 自适应粒子群优化算法

输入: 目标集 T_i , 加速系数 c_1, c_2 , 惯性权重参数, 上一轮决策 a_i^{t-1} , 上一轮决策收益 U_i^{t-1}

输出: U_i^t , BR $_i^t$

算法流程:

1. 根据目标集T_i分配情况随机产生当前种群;

- 2. 将上一轮决策 a_i^{t-1} 插入当前种群;
- 3. 对于每轮进化 $g = 1, 2 \cdots$ 执行循环
- 4. 对于种群中每个粒子p = 1,2...执行循环
- 5. 冲突消解并计算当前收益;
- 6. 比较和替换个体最优和全局最优;
- 7. 更新粒子的位置和速度;
- 8. 边界条件处理;
- 9. 结束循环

10. 结束循环

11. 将当前种群中最优 U_i^t 与上一轮的最优 U_i^{t-1} 进行比较,将更高收益的 U_i 视作BR $_i^t$,并更新当前决策a

3.4 多星分布式优化求解分析

1) 存在性分析.

在多星分布式任务规划问题中,纳什均衡的存在 性主要参考文献[11]给出的定理.

定义2(纳什均衡存在性) 如果一个博弈中的 博弈者和决策集是有限的,则该博弈至少包含一个纳 什均衡.

在一次规划中,卫星数量、任务数量和产生的观测 窗口数量都是有限的,这也意味着卫星可以采取的行 动集合也是有限的.参照定理1给出的结论,可知卫星 分布式规划中存在纳什均衡.

2) 收敛性分析.

由本文提出的分布式优化策略可知,当星间通信 畅通时,每一轮博弈中各卫星的优化决策是相互独立 的,经过t轮博弈后,整个系统的收益F为

$$F = \sum_{i=1}^{N} U_i^t(a_i).$$
 (15)

仅从式(15)来看,似乎只需保证每个个体的收益 U^t是当前最优则能确保整体的全局最优性能.事实 上,由于每个个体的"短视"特性,个体只能基于当前 部分信息得到本轮自身的局部最优解,而局部最优的 累加却不一定代表系统层面的最优.故本文采用了贪婪准则,使得每个个体在每轮博弈后的收益一定是"非减"的,即

 $\forall i \in n, \ \forall t, \ U_i^t(a_i) \ge U_i^{t-1}(a_{i-1}). \tag{16}$

由规划收益的定义可知,在一个场景中观测收益 是有上界的,因此通过每次收益"非减"的迭代,只要 能够保证迭代次数,则可以确保分布式优化稳定下来 后,整体规划方案能够收敛至局部最优,甚至全局最 优.

3) 分布式优化与集中优化的对比.

显然,相对于集中式任务规划,分布式任务规划将 计算分散到各卫星节点,能较大程度地节约计算时间. 但由于卫星个体之间目标的分配是耦合相关的,分散 的计算方式很难从全局的角度对资源进行统筹,因此 纳什均衡下的局部最优的累加并不一定能保证全局 最优.具体的比较本文将在仿真校验中得到进一步的 分析验证.

4 仿真校验及结果分析

4.1 实验设计

1) 实验环境.

本文利用MATLAB R2018a作为开发环境对提出的问题模型和算法编程实现,利用STK 11对观测目标与卫星模型的可见窗口进行计算.操作系统为Windows 10,计算机配置为Intel Core i7–9750H, CPU 2.60 GHz, 32 GB内存.

2) 实验算例.

实验算例涉及不同数量、不同观测类型的卫星和 全球分布的观测目标.任务目标的规模为30~200不 等,目标位置在纬度-60°~60°范围内随机生成,观测 类型、优先级(1~5)随机产生;卫星的数量为6~16不 等,由一个位于600 km高度太阳同步轨道的Walker星 座构成,星座相邻轨道编号相同卫星的真近点角度差 值为2°,相邻轨道面升交点赤经差值为45°,通过增减 轨道面数量和轨道面内的卫星个数可对星座的规模 进行调整,星座内卫星的载荷类型随机生成,场景示 意图如图2所示,载荷设置参数如表2所示.



图 2 STK的场景示意图 Fig. 2 Illustration of scenario setting in STK

表 2 STK内载荷参数设置表 Table 2 Pavload parameters setting in STK

Tuble 2 Tuyloud parameters setting in 911k									
参数类别	光学	参数类别	SAR						
SensorType	SimpleConic	MinElevationAngle	15.2°						
FOV	5°	MaxElevationAngle	51.9°						
SlewRange	$-40^{\circ}{\sim}40^{\circ}$	$Forward {\it Exclusion} Angle$	5.7°						
Lighting	$SunAng > 15^{\circ}$	AftExclusionAngle	8.6°						

3) 评价指标.

对于规划结果的评价指标主要包含3个,一是规划 方案整体收益(Profit),二是任务完成率(CR),这两个 指标主要反映了卫星任务规划方案的执行价值,是工 程上比较关注的两个要素;三是规划时间(RT),主要 反映了规划算法的求解速度. 4) 比对算法.

本文选用了集中式的禁忌搜索算法(CTS)^[10]、集 中式的粒子群算法(CPSO)^[12-13]、集中式的遗传算法 (CGA)^[14]与本文提出的分布式任务规划算法(distributed mission scheduling algorithm, DMSA) 在不同规 模的场景下的表现进行比较.

4.2 实验结果分析

本文随机生成了不同规模的任务场景,并分别利 用不同算法进行了任务规划,对任务收益、任务完成 率、规划时间进行了记录,实验结果如表3所示.总的 来看,随着场景中卫星数量和目标数量的增多,整体 的规划收益均呈上升趋势,但也由于问题复杂度的提 升,规划消耗的时间越来越多.

	表 3	不同规模场景的实验结果	
Table 3	Sim	ulation results in different scenar	ios

场景 序号	场景		DMSA		CGA		CPSO			CTS				
	卫星	目标	Profit	CR	RT/s	Profit	CR	RT/s	Profit	CR	RT/s	Profit	CR	RT/s
1	6	30	19	0.93	4.6	19.8	0.97	9.6	20.2	0.97	32.9	20	0.95	5.3
2	6	50	31.2	0.96	4.8	29.3	0.9	21.5	31.6	0.96	38.7	30.4	0.94	7.8
3	6	100	64.2	0.99	17.1	59.4	0.96	45.4	64.5	1	48.8	59.3	0.91	21.2
4	8	100	60.7	0.98	19.9	57.9	0.92	56.2	61.6	0.98	78.6	57.2	0.86	20.8
5	8	150	91.9	0.87	28.2	93.8	0.89	126.6	98.9	0.96	168.5	90.3	0.85	31.2
6	16	150	93.4	0.91	29.8	95.3	0.93	272.6	100.3	1	370.7	90.1	0.84	43.7
7	16	200	125.3	0.95	31.2	123.5	0.92	359.3	129.7	0.98	476.3	118.2	0.88	52.6

1) 智能优化算法规划效果的比较与分析.

从智能优化算法的搜索方式角度而言,粒子群算 法和遗传算法均属于全局搜索算法,禁忌搜索算法则 属于局部领域搜索算法.如图3所示,折线代表各类算 法的求解时间,柱形图代表各类算法的观测方案收益: 当问题规模较小时,不同算法优化后的方案收益差异 不大;由于禁忌搜索算法只需对解空间的局部进行搜 索,相较于其它集中规划算法,它在计算速度上有较 大优势;随着问题规模的增大,粒子群算法全局搜索 能力强的优势则得以体现,在各个场景中均能提供收 益最高、完成率最大的规划方案,遗传算法和禁忌搜 索算法则容易更早地收敛,从而陷入局部最优.



Fig. 3 Profit & computing time in different scenarios

2) 规划方式的比较与分析.

从规划方式的角度而言,尽管总体收益均会低于 集中式规划方法,分布式任务规划在计算时间上的优 势明显,这是因为将目标分配到个体上进行单星规划 的方式有益于缩减解的搜索空间,从而提升求解效率; 单独将CPSO与DMSA的计算时间进行对比,可以看 到:当问题规模扩大时,DMSA不会像CPSO一样出现 规划时间激增的情形;当目标数量一定仅卫星数量发 生变化时,DMSA的计算时间并没有显著增长,这也 充分体现了分布式系统采用"无中心节点"管控的优 势,即:系统中任意节点的添加、删减并不会对系统稳 定性产生根本影响,个体间既可以通过通信保持联系 进行协同,亦可以保持相对独立,能够大大增加了分 布式系统运行的灵活性和鲁棒性.

5 结论与下一步工作展望

随着航天、通信、网络等技术的不断进步,异构卫 星间分布式、动态组网必将成为主流发展趋势.传统 的集中管控方式已经难以满足多星系统对任务协同、 快速响应、系统稳定等方面的需求,研究卫星分布式 任务规划技术具有重要意义.

针对对地观测卫星多星任务规划问题,本文提出 了一种基于博弈理论的分布式卫星自主任务规划模 型和优化算法,并依托典型场景开展了计算机仿真校 验.仿真结果显示:本文提出的方法能有效地克服传 统方法在大规模任务规划场景中,优化时间激增、收 敛速度慢等缺点.分布式任务规划方法能够灵活地应 对不同规模的问题场景,算法性能不会随着问题规模 的增大而出现显著的下降,能稳定高效地获取性能略 低于集中式规划的全局较优解.

未来的工作将进一步完善规划模型,引入更多与 实际问题相匹配的约束条件使得卫星规划模型更加 全面具体.探索受限通信条件下的分布式协同规划方 法,研究性能更佳的优化算法,为解决多星任务规划 问题提供更多手段.

参考文献:

- GILSON K, CULTER J, COHN A, et al. Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem. *Computers & Operations Research*, 2015, 57: 1 – 16.
- [2] WANG Jun. Research on modeling and optimization techniques in united mission scheduling of imaging satellites. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
 (王钧. 成像卫星综合任务调度模型与优化方法研究. 长沙: 国防科 学技术大学, 2007.)
- [3] VASQUEZ M, HAO J K. A "logic-constrained" knapsack formulation and a tabu algorithm for the daily photograph scheduling of an

earth observation satellite. Computational Optimization and Applications, 2001, 20(2): 137 – 157.

[4] WANG Chong. Distributed cooperative task planning research of earth observing satellites based on agent. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (王冲. 基于Agent的对地观测卫星分布式协同任务规划研究. 长沙:

国防科学技术大学, 2011.) [5] WANG C, TANG J, CHENG X, et al. Distributed cooperative task planning algorithm for multiple satellites in delayed communication environment. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016,

27(3): 619 - 633.

- [6] CHEN Taoyi, FENG Xiaoen, CHEN Jinyong, et al. A multi-satellite autonomous coordination task planning method based on bidding mechanism. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(4): 138 – 145. (陈韬亦, 冯小恩, 陈金勇, 等. 一种招投标机制的多星自主协同任务 规划方法. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(4): 138 – 145.)
- [7] IACOPINO C, PALMER P, POLICELLA N, et al. How ants can manage your satellites. Acta Futura, 2014, 9: 57 – 70.
- [8] WU G, LIU J, MA M, et al. A two-phase scheduling method with the consideration of task clustering for earth observing satellites. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(7): 1884 – 1894.
- [9] MAO Liheng, DENG Qing, LIU Rouni, et al. CPM-GA for multi-satellite and multi-task simulation scheduling. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(1): 205 214.
 (毛李恒,邓清,刘柔妮,等. 针对多星多任务仿真调度的关键路径遗传算法. 系统仿真学报, 2021, 33(1): 205 214.)
- [10] CUI J, ZHANG X. Application of a multi-satellite dynamic mission scheduling model based on mission priority in emergency response. *Sensors*, 2019, 19(6): 1430.
- [11] JIANG A X, LEYTON-BROWN K. A tutorial on the proof of the existence of Nash equilibria. University of British Columbia Technical Report TR-2007-25.pdf, 2009, 14.
- [12] GIOVANINI L, BALDERU J, KATEBI R. Autonomous decentralized mission planning for clusters of UUV. 2006 UKACC Control 2006 Mini Symposia. Glasgow, UK: IET, 2006: 133 – 143.
- [13] HAN Y, LUO J, XU X. On the constellation design of multi-GNSS reflectometry mission using the particle swarm optimization algorithm. *Atmosphere*, 2019, 10(12): 807.
- [14] SONG Yanjie, WANG Pei, ZHANG Zhongshan, et al. An improved genetic algorithm for multi-satellite mission planning problem. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 25 31.
 (宋彦杰, 王沛, 张忠山, 等. 面向多星任务规划问题的改进遗传算法. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 25 31.)

作者简介:

刘立昊 博士研究生,研究方向为卫星智能任务规划, E-mail: liulihao070204@163.com;

董正宏博士,研究员,研究方向为智能空间信息系统设计、空间 智能技术, E-mail: dzh.bj@163.com;

苏昊翔博士研究生,研究方向为智能优化算法, E-mail: lelouch zero1221@163.com;

陈公政 博士研究生,研究方向为空间智能技术, E-mail: 9941626 06@qq.com.