

基于分治迭代策略的空天观测资源协同任务规划

伍国华 廖文昆 李夏苗

1 中南大学交通运输工程学院	湖南	长沙	410075
2 中南大学交通运输工程学院	湖南	长沙	410075
3 中南大学交通运输工程学院	湖南	长沙	410075

摘要：空天协同对地观测是对地观测领域发展的新趋势。针对空天对地观测资源缺乏协同合作的难题，构建了基于多智能体（multi-agent system, MAS）的空天资源协同任务规划框架，建立了面向对地观测任务的空天对地观测资源协同任务规划模型。本文基于分而治之——迭代优化的思想，根据任务分配到不同观测平台的观测机会和冲突度，对未调度完成的任务进行动态重分配。仿真实验验证了模型、算法的合理性和优越性，对未来空天观测资源传感网络的管控提供了技术支撑。

关键词：空天协同观测；多 Agent 协同框架；分而治之；迭代优化

Collaborative Task Planning for Space-Aeronautics Observation Resources based on Divide-Conquer and Iterative-Optimization

Wu Guohua Liao Wenkun Li Xiamiao

*(¹Traffic and Transportation School, Central South University,
Changsha, Hunan 410075, China)*

*(²Traffic and Transportation School, Central South University,
Changsha, Hunan 410075, China)*

*(³Traffic and Transportation School, Central South University,
Changsha, Hunan 410075, China)*

Abstract Space-aeronautics Earth-observation is a new trend in the field of Earth observation. In view of the lack of synergy between air and space observation resources, a multi-agent collaborative task planning framework based on multi-agent system (MAS) is constructed, as well as establish a Cooperative task planning Optimization Model for Space-aeronautics Earth-Observation Resources for Earth Observation Missions. Simulation experiments verify the rationality and superiority of the model and algorithm, which has partial technical support for the control of the future Space-aeronautics Observation Resource sensing network.

Keywords: space-aeronautics synergistic observation, multi-agent coordinated frame, divide-conquer, iterative optimization

0. 引言

我国计划在十三五规划中,提出加强前瞻部署,在空天海洋、生命科学、信息网络等领域,培育一批战略型产业。其中,“空天一体化观测系统”是重要目标之一。“空天一体化观测系统”指的是综合利用航空遥感、航天遥感技术,实现对地面目标进行有效、实时、多维、多时空观测^[1]。然而,目前对“空天一体化观测系统”的研究相对较少,对单一观测平台的任务规划技术研究较为丰富。其中,卫星观测平台的多星协同任务规划问题研究较多,UAV 观测平台的多机协同任务规划问题研究相对较少。

在国内,国防科大学者阮启明博士^[2]基于约束满足,建立了多星协同问题的约束优化问题模型,并提出了一种禁忌算法与约束传播相结合的求解机制。国防科大贺川博士^[3]针对应急条件下的成像观测任务,设计了多星协同调度框架,将多星调度问题拆解为任务排序主问题和资源匹配子问题,并采用改进粒子群算法进行求解。针对多 UAV 协同任务规划问题,国防科大田菁博士^[4]认为该问题属于任务分配和资源调度范畴,建立了多 UAV 协同侦查任务规划模型,并提出了“自适应”的多目标优化算法 AEMOM 对该问题进行求解。西北工业大学王强博士^[5]提出一种改进离散粒子群算法,建立了粒子与实际问题的映射,设计了基于移位运算的粒子更新方式,并利用粒子多样性评估粒子的进化能力,通过重构策略改善粒子的搜索能力。

单一观测平台的任务规划技术已经趋向成熟,但是面对应急灾害条件下的观测任务,如灾害监测、反恐维稳、群体事件、战场监测,需要观测资源从多维度、多时空、多层次的角度采集任务数据,单一的观测平台并不能满足需求,因此需要多平台多类型传感器互补提升对地观测的能力。国防科学技术大学白国庆博士^[6]提出了多平台协同进化调度算法(MPCCPSA),采用分治-合作策略将任务分解分配到各平台。MPCCPSA 采用的是分层式协同进化框架,但是对于多个同类型观测资源没有进行统一管理,当观测资源规模扩大时,不便于管理,可扩展性差。Herold^[7]采取分层式框架,将协同问题转化为子规划中心间的任务分配问题,并对分配到子规划中心的任务采用线性规划的方法求解。然而多星调度问题和多 UAV 协同任务规划问题属于 NP-hard 问题,因此现实情况下,线性规划方法并不适用。国防科大余婧^[8]在她的硕士论文中,设计了空天对地协同任务规划框架,

空天对地观测资源只包括卫星和飞艇,针对飞艇调度提出了基于局部重调度策略和迭代插入替换策略的任务重调度算法,对协同任务分配,采用合同网的思想,针对具体任务的具体需求提出了与之适应的任务协同分配机制。针对多阶段任务,国防科大李军博士^[9]提出了基于市场模型的异构 MAS (Multi-Agent System) 多阶段协同任务规划算法和自适应“超级步”的资源 Agent 协同任务规划算法,基于 MAS 方法虽然不能保证得到全局最优解,但是具有系统鲁棒性和扩展性强的优点。针对海上移动目标,国防科大梁星星^[10]在他的硕士论文中,提出了移动目标的跟踪策略,以及基于卫星观测信息以及 UAV 能力约束的目标分组方法,将任务分组后直接分配给观测资源 Agent 去执行。该方法可以得到较好的局部最优解,却不能得到全局最优解。针对点状目标,中南大学伍国华教授^[11]提出了一种基于多 Agent 的分层协同规划框架,整合卫星、UAV 及飞艇构成一个分布式和松耦合的对地观测系统,这个系统具有良好的可扩展性以及容错性,并且在协同层,具有整个系统的全局视图,有助于将观测任务合理地分配给不同的子规划中心,但是在任务分配机制和任务分配方案的更新机制方案没有进行深入研究。

本文的创新点:

(1) 提出了一种基于分而治之、迭代优化策略的空天资源协同任务规划方法。本文的空天资源包括卫星和 UAV,研究对象为点状目标。将多 Agent 协同任务规划问题转化为子规划中心间的任务分配问题,拆解空天资源协同任务规划问题为多 UAV 协同任务规划子问题和多星调度子问题,以及任务分配主问题。

(2) 改进了任务分配机制,并提出了任务分配方案的更新机制,在任务分配时引入了基于风险评估的冲突度计算方法,以及在任务更新时结合了禁忌列表策略,可以有效提高算法的性能。

1. 空天资源协同任务规划问题分析

空天资源协同任务规划过程如图 1 所示,用户向地面接收处理系统提交任务需求,地面接收处理系统对用户需求进行处理,向天基系统或空基系统发布计划指令,天基系统或空基系统接到计划指令后,安排卫星或 UAV 执行,执行结束后将观测数据传输给地面接收处理系统,再经由地面接收处理系统交给提交观测需求的用户。

卫星获取观测目标遥感信息的流程为：目标位于卫星星下点轨迹的附近，当卫星飞经目标点的上方时，星载传感器开机，调整传感器的侧摆角度观测目标，观测完成，传感器关机。当卫星经过地面接收站上方时，地面接收站的雷达捕捉到卫星信号，建立通信链路，卫星将存储的数据发送给地面接收站。UAV 获取观测目标数据的流程为：UAV 飞抵目标上方，机载传感器开机，调整姿态，观测目标，观测完成，传感器关机，返回基地，并将观测数据交给基地。

根据 UAV 和卫星获取目标数据的流程，建立多 UAV 任务规划模型和多卫星任务规划模型，并将它们统一在多 Agent 分层协同规划框架中，构成一个完整的空天资源任务协同规划模型。

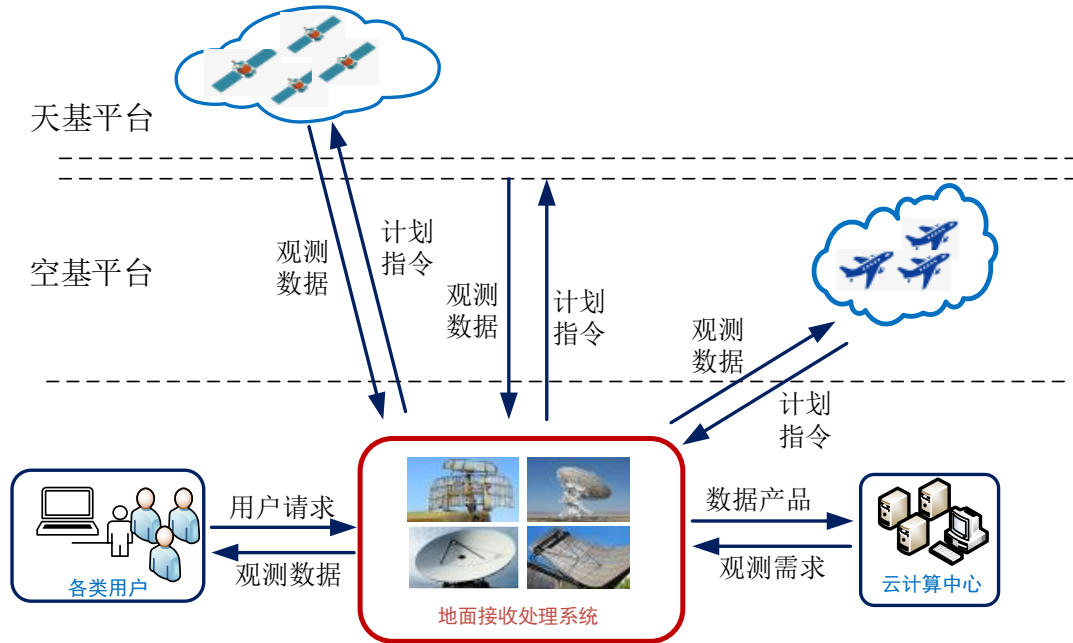


图 1 空天资源协同任务规划过程

Fig.1 Aerospace Resource collaborative tasks planning process

假设有 M 个任务， $T = \{t_i | i = 1, 2, \dots, M\}$ 是待观测的目标集合，目标具有优先级，因此可以用权重表示， $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, M\}$ 是待观测目标的权重集合。 $WT = \{[t_start_i, t_end_i] | i = 1, 2, \dots, M\}$ 是待观测目标自带的时间窗， t_start_i 表示目标最早的开始观测时间， t_end_i 表示目标的最晚的结束观测时间，只有这个时间段范围内的观测是有效的，如果观测资源不在这个时间段范围内对目标进行观测，那么目标的价值失效。 $dur = \{dur_i | i = 1, 2, \dots, M\}$ 是待观测目标所需要的持续

观测时间。 $Pos = \{[lon_i, lat_i] | i = 1, 2, \dots, M\}$ 是目标的经纬度坐标。两个目标之间的距离可以用经纬度距离公式表示

$$d_{ij} = 2R \cdot \arcsin(\sqrt{\sin^2(\frac{lat_i - lat_j}{2}) + \cos(lat_i) \cos(lat_j) \sin^2(\frac{lon_i - lon_j}{2})}) \quad (1)$$

1.1 多 UAV 子规划中心协同任务规划模型

多 UAV 协同任务规划问题(Multiple UAV cooperative tasks planning Problem, MUCTPP)本质上属于复杂的组合优化问题, 根据多 UAV 协同观测任务的特点, 可把其转换为带时间窗的并行机调度问题(Parallel Machine Scheduling with Time Windows, PMSPTW)。MUCTPP 是单基地问题, 可以描述为: 有 N_v 架 UAV, 从基地出发, 安排执行 M 个分布于不同空间位置的任务 (任务集合 T), 然后再返回基地。任务 $t (t \in T)$ 需要的持续观测时间为 dur_t , 当一架 UAV 在观测任务 t 时, 观测过程不能中断, 也不能被另一个任务抢占, 只有任务 t 被完成后, UAV 才能去完成另一个任务。如果有两个任务 t_i, t_j 由同一架 UAV 执行观测, UAV 在观测完 t_i 后需要一个转换时间 (UAV 在 t_i 的位置飞到 t_j 的位置需要的飞行时间), 才能继续执行 t_j , 由于 UAV 的资源限制和任务冲突, 有些任务可能无法完成, 因此确定一个最优的调度方案使得 UAV 在满足各种约束条件下, 完成任务获得总的收益值最大。

由于任务的执行时间受到 UAV 的飞行速度 V_u 和任务与基地 $M+1$ 之间的距离 $d_{i,M+1}$ 限制。假设在 UAV u 下, $TF = \{[ts_i^u, te_i^u] | i = 1, 2, \dots, M; u = 1, 2, \dots, N_v\}$ 为待观测任务的可见时段。其中, ts_i^u 表示任务的最早可见时间, te_i^u 表示任务的最晚可见时间。根据 UAV 的性质, 可得

$$ts_i^u = \frac{d_{i,M+1}}{V_u}, \quad te_i^u = \frac{D_u}{V_u} \quad (2)$$

假设 $TW = \{[tws_i^u, twe_i^u] | i = 1, 2, \dots, M; u = 1, 2, \dots, N_v\}$ 为待观测任务在 UAV u 观测下的有效观测时间窗。其中, tws_i^u 表示任务的最早开始执行时间, twe_i^u 表示任务的最晚执行结束时间。如图 2, 是其中一种情况下的有效观测时间窗示意图。

$$tws_i^u = \max\{t_start_i, ts_i^u\}, twe_i^u = \min\{t_end_i, te_i^u\} \quad (3)$$

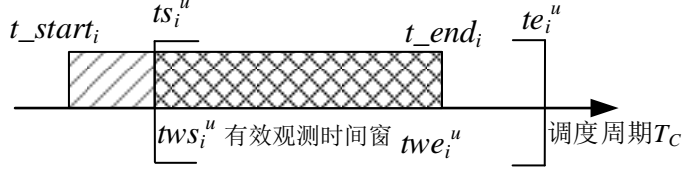


图 2 任务的有效观测时间窗示意图

Fig.2 Diagram of the effective observation time window of task

MUCTPP 的优化目标：完成任务获得的总收益值最大。决策变量 $x_{ij}^u = 1$ 表示 UAV u 从任务 t_i 飞往 t_j ， $x_{ij}^u = 0$ 表示 UAV u 不飞往。

$$\max \sum_{u=1}^{N_V} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M p_i \cdot x_{ij}^u \quad (4)$$

$$\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^M x_{ij}^u \leq 1, \sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^M x_{ij}^u \leq 1, x_{ii}^u = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ij}^u = 1, & i = M+1, \forall u \in [1, N_V] \\ \sum_{i=1}^M x_{ij}^u = 1, & j = M+1, \forall u \in [1, N_V] \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u \leq 1, \sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{M+1} x_{ji}^u \leq 1, \quad \forall i \in [1, M] \quad (7)$$

$$\sum_{u=1}^{N_V} (x_{ij}^u + x_{ji}^u) \leq 1, \quad \forall i, j \in [1, M], i \neq j \quad (8)$$

$$\left(\sum_{u=1}^{N_V} x_{ij}^u \right) \cdot \left(\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk}^u - 1 \right) = 0, \quad \forall i, j \in [1, M], i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{i, j \in S} x_{ij}^u \leq |S| - 1, \quad 2 \leq |S| \leq M - 2, S \subset \{1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

$$[wts_i^u, wte_i^u] \subset [tws_i^u, twe_i^u], \quad \text{if } \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u = 1, \quad \forall u \in [1, N_V] \quad (11)$$

$$wte_i^u - wts_i^u \geq dur_i, \quad \text{if } \sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^M (x_{ij}^u + x_{ji}^u) \geq 1, \quad \forall i \in [1, M] \quad (12)$$

$$wte_i^u + \frac{d_{ij}}{V} \leq wts_j^u, \quad \text{if } x_{ij}^u = 1, \quad \forall i, j \in [1, M] \quad (13)$$

$$[wts_i^u, wte_i^u] \cap [wts_j^u, wte_j^u] = \emptyset, \quad \forall i, j \in [1, M], i \neq j, \forall u \in [1, N_v] \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u \leq M_u, \quad \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u \cdot dur_i \leq E_u, \quad \sum_{i=1}^{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u \leq D_u, \quad \forall u \in [1, N_v] \quad (15)$$

其中，约束（5）表示每个任务只能被执行一次且 UAV 不能从任务 i 飞到任务 i ；约束（6）表示每一架 UAV 必须从基地出发，也必须返回基地；约束（7）表示每一个任务的紧前或紧后任务只有 1 个；约束（8）表示任意两个任务的执行顺序具有唯一性；约束（9）（10）表示保证 UAV 的任务序列和基地构成一个完整的闭合回路，同时 UAV 在任何一个任务子集（不包含基地 $M+1$ ）不能形成闭合回路；约束（11）表示 UAV 只能在任务的有效观测时间窗内执行任务；约束（12）表示如果任务被安排执行了，则执行时间不应低于所需的持续工作时间；约束（13）表示 UAV 从一个任务飞到另一个任务需要飞行时间；约束（14）表示 UAV 在执行过程中不能出现抢占式服务，一旦开始执行，在完成前不能终止；约束（15）表示 UAV 的资源限制：存储容量、能量及航程限制。

1.2 多卫星子规划中心协同任务规划模型

多星一体化调度问题也可以看成一类并行机调度问题(PMSPTW)。假设卫星是机器，观测目标是工件，卫星观测目标时需要一定的持续观测时间，并需要消耗资源，同时卫星观测不同目标时需要一定的转换时间进行侧摆角调整等操作；而机器加工工件也需要一定的加工时间，也需要消耗资源，以及加工不同工件时，需要准备时间。因此多星一体化调度问题可以描述为：有 N_A 颗观测卫星，安排执行 M 个任务（任务集合设为 T ）。任务 $t (t \in T)$ 需要的持续观测时间为 dur_t ，当一颗观测卫星在观测任务 t 时，观测过程不能中断，也不能被抢占。如果有两个任务 t_i, t_j 由同一颗卫星执行观测，该卫星在观测完 t_i 后需要一个转换时间，才能继续执行 t_j ，由于受到资源限制和任务时间窗的冲突，有些任务可能无法同时完成，因此确定一个最优的调度方案使得卫星在满足各种约束条件下，完成任务获得总的收益值最大。

设卫星观测资源为 $R = \{R_s | s = 1, 2, \dots, N_A\}$ ，其中 N_A 表示卫星的数量。卫星 R_s 对应的轨道资源为 $O^s = \{O_j^s | j = 1, 2, \dots, K\}$ ，其中 K 表示卫星 R_s 在一个调度周期

内绕地圈次。再假设 $TF = \{[ts_{ij}^s, te_{ij}^s] | i=1,2,...,M; j=1,2,...,K; s=1,2,...,N_A\}$ 是待观测的任务在卫星 R_s 的第 j 个轨道上的可见时间窗，其中 ts_{ij}^s 表示任务可见时间窗的最早可见时间， te_{ij}^s 表示任务可见时间窗的最晚可见时间。

假设 $TW = \{[tws_{ij}^s, twe_{ij}^s] | i=1,2,...,M; j=1,2,...,K; s=1,2,...,N_A\}$ 为待观测任务在卫星 R_s 的第 j 个轨道上的有效观测时间窗。其中， tws_{ij}^s 表示任务的最早开始执行时间， twe_{ij}^s 表示任务的最晚执行结束时间。

$$tws_{ij}^s = \max\{t_start_i, ts_{ij}^s\}, twe_{ij}^s = \min\{t_end_i, te_{ij}^s\} \quad (16)$$

多星一体化调度问题的优化目标为通过多星协同，使得最终完成的任务获得收益值最大。决策变量 $x_{ij}^s=1$ 表示任务 i 在卫星 R_s 的轨道圈次 O_j^s 上完成， $x_{ij}^s=0$ 表示不完成。变量 $y_{ih,j}^s=1$ 表示在轨道圈次 O_j^s 上，任务 i 先于任务 h 被完成，否则 $y_{ih,j}^s=0$ 。

$$\max \sum_{s=1}^{N_A} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M p_i \cdot x_{ij}^s \quad (17)$$

约束条件：

(1) 唯一性约束：任务最多只能被执行一次。

$$\sum_{s=1}^{N_A} \sum_{j=1}^K x_{ij}^s \leq 1, \quad \forall i \in [1, M] \quad (18)$$

(2) 时间窗约束：卫星只能在任务的有效观测时间窗内观测。

$$[wts_{ij}^s, wte_{ij}^s] \subset [tws_{ij}^s, twe_{ij}^s] \quad \text{if } x_{ij}^s = 1, \forall i \in [1, M], \forall j \in [1, K], \forall s \in [1, N_A] \quad (19)$$

(3) 持续时间约束

$$wte_{ij}^s - wts_{ij}^s \succ dur_i \quad \text{if } x_{ij}^s = 1, \forall i \in [1, M], \forall j \in [1, K], \forall s \in [1, N_A] \quad (20)$$

(4) 任务一旦被执行，则不能被其它任务抢占。

$$[wts_{ij}^s, wte_{ij}^s] \cap [wts_{kj}^s, wte_{kj}^s] = \emptyset, \quad \forall i \in [1, M], \forall j \in [1, K], \forall s \in [1, N_A] \quad (21)$$

(5) 卫星 R_s 的轨道圈次 O_j^s 上，两个不同的任务执行顺序具有先后之分。

$$y_{ih,j}^s = \begin{cases} 1 & wts_{hj}^s - wte_{ij}^s \succ 0 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (22)$$

(6) 转换时间约束

$$wte_{ij}^s \cdot y_{ih,j}^s - wts_{hj}^s \geq switch_{ih,j}^s, \forall i, h \in [1, M], i \neq h, \forall j \in [1, K], \forall s \in [1, N_A] \quad (23)$$

(7) 存储容量约束：卫星在一个调度周期内消耗的存储资源不允许超过 M_s 。

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M x_{ij}^s \leq M_s, \forall s \in [1, N_A] \quad (24)$$

(8) 能量约束：卫星在一个调度周期内消耗的能量不允许超过 E_s 。

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M x_{ij}^s \cdot dur_i \leq E_s \quad (25)$$

1.3 基于分治策略的多 Agent 协同任务规划模型

为了求解待观测任务分配给 UAV 和卫星观测收益值，本文采用一种基于分治策略的多 Agent 分层协同规划框架，该框架是一种混合式的多 Agent 体系结构，它通过协同层集中管理和协调各子规划中心 Agent 协同完成调度任务，各子规划中心 Agent 采取分布式结构，无主次先后之分，并具有直接交互的能力。基于分而治之的策略，各子规划中心 Agent 具有自治性和独立性，通过对传感资源进行调度完成分配的任务，实现任务分配方案的全局最优性。

如图 3 所示，本文设计的多 Agent 协同框架共有四层，分别是应用层、协同层、服务层和传感资源层。应用层是用户提交的任务观测请求，服务层是由控制传感观测资源的子规划中心 Agent 组成，每一个子规划中心 Agent 控制若干个同种类型的传感资源，例如卫星子规划中心只控制若干个卫星 Agent。每一个子规划中心 Agent 都会对分配到的任务确定一个最优的资源调度方案，确保该子规划中心 Agent 控制的观测资源完成任务获得的累加收益值最大。传感资源层也就是卫星和 UAV 构成的传感资源网络，它们被分为若干组，分别由服务层中的子规划中心 Agent 单独控制。在应用层和服务层中间的是协同层，它相当于一个“指挥中心”，根据应用层的任务性质，例如观测的优先级、分辨率要求、任务类型需求、频谱要求，以及服务层中各子规划中心 Agent 的能力（能否满足分辨率及频谱要求等）、观测资源的剩余情况等，确定合理的任务分配方案，使得分配的任务能以最大概率被完成。

因此根据多 Agent 协同规划框架建立多 Agent 协同规划模型，多 Agent 协同规划模型是基于多 UAV 和多卫星的任务规划模型，它将任务集 T 中的任务分配到 UAV 和卫星子规划中心，由子规划中心控制的传感观测资源进行协同

调度，因此多 Agent 协同规划模型的优化目标为：通过合理分配任务到子规划中心，使得任务完成获得总的收益值最大。

$$\max \sum_{i=1}^M (\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u + \sum_{s=1}^{N_A} \sum_{j=1}^K x_{ij}^s) \cdot p_i \quad (26)$$

由于任务最多只能被完成一次，因此被分配的任务要满足唯一性约束。

$$(\sum_{u=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^u + \sum_{s=1}^{N_A} \sum_{j=1}^K x_{ij}^s) \leq 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (27)$$

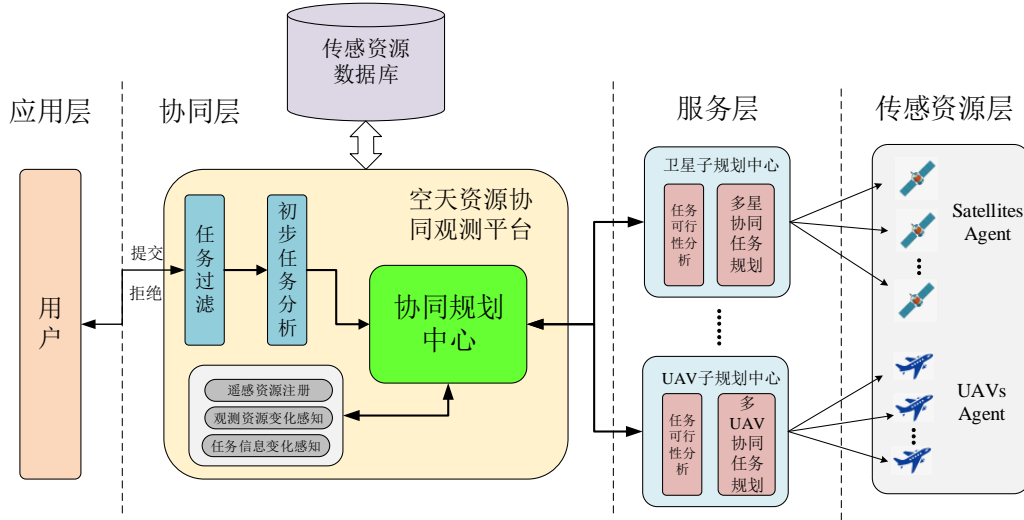


图 3 多 Agent 的多观测平台协同规划框架

Fig.3 Multi-agent multi-observation-platform coordinated planning architecture

2. 基于禁忌列表的任务分配算法

多 Agent 协同框架的协同层，其作用是根据用户提交的任务性质和子规划中心的能力等情况，确定一个最优的任务分配方案，使得分配给各子规划中心的任务能以最大可能性被完成。因此协同层在任务分配过程中，应根据一个启发式规则操作。当待调度的任务在 UAV 或卫星下具有观测机会时，由于任务需求的约束和资源的限制，因此待调度的任务应分配到具有充足资源的观测资源上，并且与观测资源已调度的任务尽量不发生冲突。如果待调度的任务与已调度的任务可能会发生冲突，那么就需要进行冲突消解。冲突消解一般有两种手段：一是待调度的任务替换掉已调度的任务，二是待调度的任务不插入到该观测资源的任务序列中，而是选择不发生冲突或者发生冲突可能性更小的观测资源进行插入。根据上述原则，本文提出了基于优先级、观测机会和冲突度三个启发式准则进行任务分配的方法。

2.1 启发式准则计算

2.1.1 优先级

用户提交的观测请求具有紧迫程度和重要程度之分，对于时效性较强且重要程度较高的任务，应给予一个较高的权重。用权重的大小来衡量任务的优先级，权重越大的任务，优先级越高。在安排任务时，应尽量先安排优先级高的任务。

2.1.2 观测机会

由于任务分布于不同位置的空间范围内，并具有时间窗的约束，UAV 和卫星可能对部分任务不具有观测的可能性。UAV 受航程和飞行速度的限制，当任务位于 UAV 的最大航程之外，或 UAV 从基地出发，以最大飞行速度赶到任务所在区域的时刻超过任务的截止时间，则任务在此 UAV 下不具有观测机会。卫星沿着固定的轨道绕地球运动，在某些轨道上卫星可能对部分任务不具有观测机会。

对观测机会进行量化，在一个调度周期内，任务在观测资源 Agent 下的观测机会数量等于任务在该 Agent 下的有效观测时间窗的数量。由于卫星在一个调度周期内绕地球运动有若干圈次，因此任务在卫星 Agent 下可能至少有 2 个有效观测时间窗。对于 UAV，规定任务最多只有 1 个有效时间窗。

2.1.3 冲突度

由于资源和任务时间窗的限制，待调度的任务与已调度的任务可能会发生冲突。冲突具体的表现为待调度任务的插入会干扰观测资源对已调度任务的完成，导致观测资源只能选择部分任务完成，因此在任务分配到不同子规划中心时，应尽量选择对已调度任务干扰较小的子规划中心进行插入。为了量化冲突度，可以基于任务的优先级来计算。

假设 $Q_{ij} = \{q_{ij}^r \mid r=1,2,\dots,z_{ij}\}$ 是任务 t_i 在观测资源 j 上的观测机会集合，其中 z_{ij} 表示任务 t_i 在观测资源 j 上的观测机会数量，即有效观测时间窗的数量。设 $Y_j^r = \{t_y \mid y=1,2,\dots,l\}$ 为观测资源 j 上与观测机会 q_{ij}^r 对应的已调度任务集，其中 l 表示观测资源 j 上已调度的任务集中与任务 t_i 在观测机会 q_{ij}^r 上可能发生冲突的任

务数。对于卫星来说，如果观测机会 q_{ij}^r 对应的轨道与卫星观测 t_h 的轨道不是同一轨道，则 t_h 不在任务集 Y_j^r 中。

提出一种基于冲突风险评估的冲突度计算方法，对于未调度任务 t_i ，在观测机会 q_{ij}^r 上，与任务集 Y_j^r 中的任务都存在发生冲突的可能性，因此对冲突可能性进行量化，并结合任务的权重，可以得到待分配任务分配到观测资源的冲突度。设任务 t_i 插入到观测机会 q_{ij}^r 与任务 t_y 发生冲突的可能性为 P_{iy}^r ，则任务 t_i 在观测资源 j 上的冲突度为

$$c_{ij} = \sum_{r=1}^{z_{ij}} \sum_{y=1}^l P_{iy}^r \cdot w_y \quad (28)$$

对于 UAV Agent 来说，由于能力和时间窗的限制，任务之间可能发生两种冲突，一种是必然冲突，一种是可能冲突。必然冲突指的是两个任务必然会发生冲突，分为最大飞行距离冲突和任务截止期冲突。可能冲突指的是两个任务可能会发生冲突，导致 UAV 不能同时完成这两个任务。

最大飞行距离冲突：假设 u 表示与观测机会 q_{ij}^r 对应的 UAV， d_{ui} 、 d_{uy} 和 d_{iy} 分别表示任务 t_i 、任务 t_y 与 UAV u 基地以及任务 t_i 和任务 t_y 之间的距离。 D_u 表示 u 的最大飞行距离。如果满足

$$d_{ui} + d_{uy} + d_{iy_m} > D_u \quad (29)$$

则意味着 u 不能在一次飞行过程中不能同时完成任务 t_i 、任务 t_y ，即任务 t_i 和任务 t_y 发生冲突的可能性 $P_{iy}^r = 1$ 。

任务截止期冲突：由于任务具有时间窗的约束，如果先执行任务 t_i ， u 在任务的最早开始时间，按任务 t_i 与任务 t_y 之间的最短路线，以最大速度 V_u 飞到任务 t_y 位置的时刻超过任务的截止期，则视为必然冲突。如果满足

$$\begin{cases} tws_y + \frac{d_{iy}}{V_u} + dur_y > twe_i & \text{if } tws_i > twe_y \\ tws_i + \frac{d_{iy}}{V_u} + dur_i > twe_y & \text{if } tws_y \leq twe_i \end{cases} \quad (30)$$

则意味着在 UAV u 下，任务 t_i 和任务 t_y 发生冲突的可能性 $P_{iy}^r = 1$ 。

可能冲突：提出一种基于线性规划的思想计算两个任务 t_i 和 t_y 发生冲突的可能性大小。对于任务 t_i 和 t_y 来说，如果既不满足最大飞行距离冲突，也不满足任务截止期冲突，那么任务 t_i 和 t_y 的冲突形式必然属于可能冲突。可能冲突指的是两个任务可能会发生冲突，也可能不发生冲突，它是以一定的概率形式而存在。假设 $[tws_{ij}^r, twe_{ij}^r]$ 、 $[tws_{yj}^r, twe_{yj}^r]$ 为任务 t_i 和 t_y 的有效观测时间窗， dur_i 和 dur_y 分别是任务 $task_i$ 和 $task_y$ 的持续观测时间。 t_1 、 t_2 分别是 u 执行任务 t_i 和 t_y 的观测时间，那么 u 在执行任务 t_i 和 t_y 发生冲突必然遵循下面的规则：

$$\begin{cases} t_2 - t_1 < dur_i + d_{iy} / V_u & t_2 \geq t_1 \\ t_1 - t_2 < dur_y + d_{iy} / V_u & \text{否则} \\ t_1 \in [tws_{ij}^r, twe_{ij}^r], t_2 \in [tws_{yj}^r, twe_{yj}^r] \end{cases} \quad (31)$$

上述约束条件 (31-1) 表示如果 u 先执行任务 t_i ，假设在时刻 t_1 执行，那么 u 选择在 $[t_1, t_1 + dur_i + d_{iy} / V_u]$ 时间范围内执行任务 t_y ，就会发生冲突。约束条件 (31-2) 表示 u 先执行任务 t_y ， t_1 、 t_2 如果满足此约束两个任务就会发生冲突。因此可以根据上述约束条件构建二维平面来表示，当 t_1 、 t_2 落在阴影面积内，则表示两个任务必然发生冲突，如果不落在阴影面积内，两个任务就不会发生冲突。这两个任务发生冲突的可能性可以用阴影部分的面积除以矩形 ABCD 面积来表示，计算方法如下：

$$P_{iy}^r = \frac{\int_{a_1}^{b_1} t_1 + adjust1 dt_1 - \int_{a_2}^{b_2} t_2 + adjust2 dt_2 + tws_{yj}(a_1 - a_2) + twe_{yj}(b_1 - b_2)}{(twe_{yj} - tws_{yj}) \cdot (twe_{ij} - tws_{ij})} \quad (32)$$

其中， $adjust1$ 、 $adjust2$ 分别表示 UAV 从一个任务飞往另一个任务所需要的调整时间。

$$\begin{aligned} adjust1 &= dur_i + d_{iy} / V_u, \quad adjust2 = dur_y + d_{iy} / V_u \\ a_1 &= \max\{tws_{ij}, tws_{yj} - adjust1\}, \quad b_1 = \min\{twe_{ij}, twe_{yj} - adjust1\} \\ a_2 &= \max\{tws_{ij}, tws_{yj} + adjust2\}, \quad b_2 = \min\{twe_{ij}, twe_{yj} + adjust2\} \end{aligned} \quad (33)$$

对于卫星 Agent 来说，在同一卫星同一轨道圈次的观测下，两个任务 t_i 和 t_y 的有效时间窗如果满足

$$(twe_{ij}^r - tws_{ij}^r) + (twe_{yj}^r - tws_{yj}^r) \leq \max\{twe_{ij}^r, twe_{yj}^r\} - \min\{tws_{ij}^r, tws_{yj}^r\} \quad (34)$$

则两个任务发生冲突的可能性 $P_{iy}^r = 1$ ，否则 $P_{iy}^r = 0$ 。

2.1.4 效用函数

在子规划中心，如果任务 t_i 有更多的观测机会，那么任务 t_i 就倾向于分配给这个子规划中心。同时，如果任务 t_i 在子规划中心与已调度的任务发生冲突可能会造成任务总收益值的损失，所以冲突度越大，造成任务总的收益值损失的可能性越大，这意味着任务 t_i 能被该子规划中心所拥有的观测资源调度并完成的可能性越小。因此本文构建一个效用函数，基于任务的观测机会和冲突度，以及子规划中心所属的观测资源数量，按照最大效用值选择对应的子规划中心。

假设子规划中心集为 $S = \{S_k | k=1,2,...,n\}$ ，其中 S_k 表示子规划中心的观测资源集。效用函数为

$$U_{ik} = \sum_{j \in S_k} (1 - \frac{c_{ij}}{\max_{1 \leq k \leq n} \max_{j \in S_k} c_{ij}}) \quad (35)$$

其中， U_{ik} 表示任务 t_i 在子规划中心 k 的效用值， c_{ij} 表示任务 t_i 在观测资源 j 下的冲突度。

2.2 算法流程及框架

根据分而治之、迭代优化的思想，提出基于禁忌列表策略的两阶段任务规划算法（Two-stage Tasks Assignment Algorithm based on Taboo List, TTAA-TL），按照根据启发式准则构造的效用函数为待调度的任务选择合适的子规划中心进行分配。构造两个禁忌列表，禁忌列表 Tabu1 对任务删除操作进行禁忌，禁忌列表 Tabu2 是对任务插入操作进行禁忌。卫星子规划中心 Agent 采用基于信息素策略的启发式算法为分配给卫星子规划中心的任务进行规划，UAV 子规划中心 Agent 采用 SA_TL 算法（结合禁忌列表策略的模拟退火算法）对分配的任务进行规划。任务规划完毕后，得到子规划中心的任务调度情况和未调度情况，各子

规划中心的总体调度情况是为空天资源的协同调度方案 G 。对原分配方案构造邻域，获得新的任务分配方案，寻找更优解。

在这个算法中，通过启发式规则对任务进行删除和插入，可以更新任务分配方案，如图 5 所示，其中，启发式规则有助于算法朝着有利的方向改进，降低了搜索过程反复搜索到劣解的概率。任务的删除和插入操作引出了禁忌列表策略，禁忌列表的作用是对近期执行的搜索操作进行记忆，并对某些操作进行禁忌，可以避免算法快速陷入局部循环。随着算法的进行，对已禁忌的操作进行解禁，对部分操作重访，可以扩大解的搜索范围。

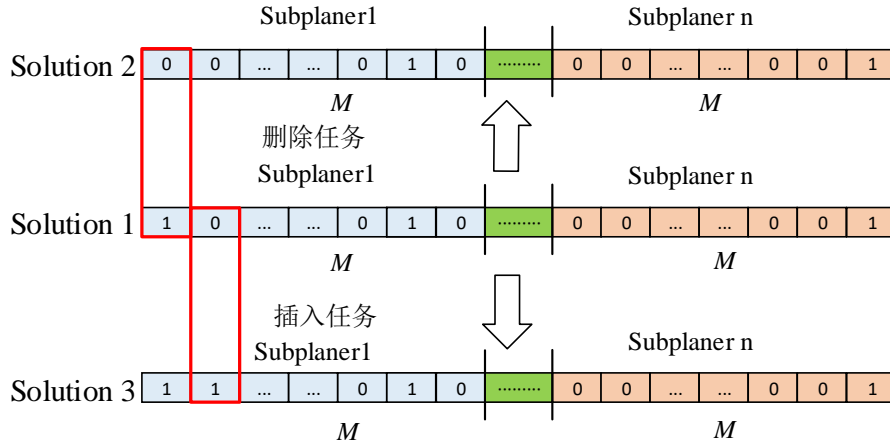


图 5 解的编码方式及构造邻域结构

Fig. X Solution encoding method and Construct neighborhood structure

该算法分两个阶段，第一阶段采用最大权重最先分配算法（High Weight First Assignment, HWFA）生成初始方案，第二阶段为基于禁忌列表策略更新任务分配方案。算法框架如下：

两阶段任务规划算法（TTAA-TL）框架

Input: 待观测任务集 $T=\{1,2,\dots,M\}$, 观测资源集 $R=\{R_u, R_s\}$,
子规划中心集 $S=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 禁忌列表集 $\text{Tabu}=\{\text{Tabu1}, \text{Tabu2}\}$,
观测机会集 $Q=\{Q_{ij} | i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N_V+N_A\}$;

Output: 任务分配方案 P

1: 阶段 1 (HWFA)

2: **while** $T \neq \emptyset$

3: 选择权重最大的任务 i ;

4: **for each** Q_{ij} 计算冲突度 c_{ij} ;

5: **for each** S_k 根据 c_{ij} 计算效用值 U_{ik} ;

6: 选择具有充足资源的子规划中心 s according to $U_{is} = \max \{U_{ik} | k=1,2,\dots,n\}$;

7: 选择具有充足资源的观测资源 l of 子规划中心 s according to

$$U_{il} = \max \{U_{ij} | j \text{ in } S_s\};$$

```

8:   将任务  $i$  分配给子规划中心  $s$  和观测资源  $l$ ;
9:   for each 观测资源和子规划中心更新剩余资源;
10:   $T = T / \{i\}$ ;
11: end while
12: Output 任务分配方案  $P$ ;
13: 阶段 2
14: while  $\text{Iter\_num} < \text{max\_Iter\_num}$ 
15:   调用 UAV 和 Satellite Algorithm 计算  $f(P)$  和调度方案  $G$ ;
16:   根据  $G$  和  $T$  获得未调度任务集  $UG$ ,  $P = G$ ;
17:   for  $g$  from 1 to 4
18:     while 从子规划中心  $k$  中删除任务  $t$  的操作被 Tabu1 禁忌
19:       根据删除邻域操作 rule- $g$  从  $G$  中选择任务  $t$ ;
20:     end while
21:     从子规划中心  $k$  中删除任务  $t$ ;
22:     插入任务  $t$  到  $UG$ ;
23:   end for
24: 更新任务分配方案  $P$ ;
25: while  $UG \neq \emptyset$ 
26:   执行操作 from step3 to step5;
27:   while 插入  $i$  到子规划中心  $s$  的操作被 Tabu2 禁忌
28:     在不考虑已被选择的子规划中心的情况下, 选择具有充足资源的
       子规划中心  $s$  according to  $U_{is} = \max \{U_{ik} | k=1,2,\dots,n\}$ ;
29:   end while
30:   选择具有充足资源的观测资源  $l$  of  $s$  according to  $U_{il} = \max \{U_{ij} | j \text{ in } S_s\}$ ;
31:   将任务  $i$  分配给子规划中心  $s$  和观测资源  $l$ ;
32:   更新任务分配方案  $P$ ;
33:   for each 观测资源和子规划中心更新剩余资源;
34:    $UG = UG / \{i\}$ ;
35: end while
36: 更新禁忌列表 Tabu1 and Tabu2;
37: 获得新的任务分配方案  $P'$ , 调用 UAV 和 Satellite Algorithm 计算  $f(P')$ ;
38: if  $f(P') > f(P)$  then
39:    $P = P'$ ;
40: end while
41: Output 任务分配方案  $P$ 

```

在构造删除-邻域结构时, 本文设计了 4 个启发式规则。

启发式规则 1: 在调度方案 G 中, 随机选择一个子规划中心, 从该子规划中心已调度的任务集中选择消耗可用资源最多的任务。对卫星 Agent 来说, 最稀缺的资源是观测机会, 也就是可见时间窗。如图 6 所示, 一个任务对一个可见时间窗的占用, 会导致其他任务无法完成。对于 UAV 来说, 在已调度的任务集中, 与其他任务冲突大的任务消耗资源更多。

启发式规则 2: 在调度方案 G 中, 随机选择一个子规划中心的权重最小的任务进行删除; 启发式规则 3: 在调度方案 G 中, 随机选择一个子规划中心的一个任务进行删除; 启发式规则 4: 对 UAV 子规划中心已调度的任务进行删除操作, 选择距离差最大的任务进行删除。

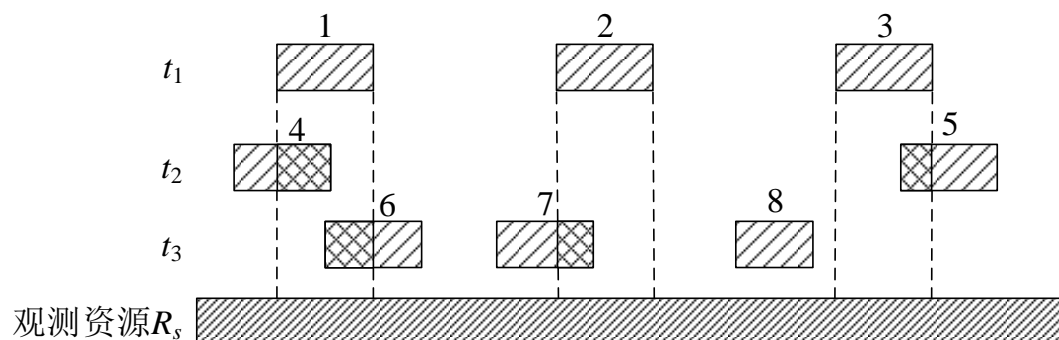


图 6 在卫星观测下可执行窗口的冲突示意图

Fig. 6 Diagram of the conflict of executable windows under satellite observation

3. 实验仿真

在配置为 2.80GHz Intel Core CPU、8GB 内存、Windows 10 操作系统的 PC 机上,使用 Matlab2018b 进行实验仿真。假设有 8 颗卫星,7 架 UAV。8 颗卫星由 2 个子规划中心控制,7 架 UAV 也由 2 个子规划中心控制。子规划中心 1 控制 4 颗卫星,子规划中心 2 控制 4 颗卫星,子规划中心 3 控制 4 架 UAV,由基地 1 控制,子规划中心 4 控制 3 架 UAV,由基地 2 控制。8 颗卫星绕地转动 16 圈,卫星的轨道数据和待观测任务的观测时间窗使用 STK 软件仿真生成。关于更具体的卫星、UAV 参数及任务的参数数据如下表 1 所示:

表 1 实验参数表

Table 1 Experimental parameters table

参数	设置
任务点规模 (个)	{200,400,600,800,1000}
任务点生成区域	北纬[25°,30°]; 东经[90°,110°]
任务点的权重	[1,10]
任务所需的持续观测时间 (s)	[1,10]
UAV 最大飞行速度 (km/h)	1440
UAV、卫星最大观测持续时间 (s)	3000
UAV、卫星最大开关机次数 (次)	200
UAV 最大巡航半径 (km)	2500
UAV 基地位置 1	(27° N, 95° E)
UAV 基地位置 2	(29° N, 105° E)
每颗卫星每天调度轨道圈次 (次)	16

通过反复实验的方法确定两个禁忌列表的长度，在实验时，以 200、400、600 个任务为对象，两个禁忌列表的长度在[3, 6]的区间内反复实验，每一组禁忌长度经过重复 10 次实验，根据实验结果，得到结果稳定且效果良好的禁忌列表长度为 TabuL1=TabuL2=3。

对比了三种算法，第一种是 HWFA 算法，第二种是两阶段任务分配算法（Two-stage Tasks Assignment Algorithm, TTAA），第三种是基于资源优先度的任务分配算法（Tasks Assignment Algorithm based on Resource Priority, TAA-RP）。TTAA 是一种贪婪算法，它按照效用值的大小选择子规划中心进行任务的分配，与 TTAA-TL 相比，没有引入禁忌列表策略，在迭代时，按照同样的规则进行删除和插入操作。TAA-RP 认为在进行任务分配时，需要更多考虑稀缺资源，对受限制大的观测资源，任务应优先分配到该观测资源的任务序列中。因此先将任务分配给卫星子规划中心，调用卫星 Agent 算法得到未调度的任务，对未调度的任务使用 K-Means 算法对任务进行聚类，将类中的任务分配给适应的 UAV 子规划中心的任务序列中。为了更新任务分配方案，在重新进行任务分配时，对卫星子规划中心上一次调度完成的部分任务在分配给卫星子规划中心时进行禁忌，在分配给 UAV 子规划中心时解禁。

在不同的任务规模下，采用 TTAA-TL、HWFA、TAA、TAA-RP 反复进行 15 次实验，得到任务收益值和收益率。具体如下表 2 所示。

表 2 各任务分配算法对各案例的求解结果

Table 2 Results of all tasks assignment algorithm solving each case

Case	任务规模	HWFA		TTAA		TAA-RP		TTAA-TL	
		收益值	收益率	收益值	收益率	收益值	收益率	收益值	收益率
C1	200	880.60	76.51%	997.40	86.67%	973.40	84.57%	1043.4	90.65%
C2	400	1151.40	51.47%	1321.63	59.08%	1274.10	56.96%	1368.5	61.18%
C3	600	1317.50	39.61%	1463.40	44.00%	1392.50	41.87%	1579.8	47.50%
C4	800	1468.70	33.15%	1591.20	35.91%	1448.25	32.68%	1731.2	39.07%
C5	1000	1505.67	26.98%	1637.60	29.34%	1570.25	28.14%	1770.8	31.73%

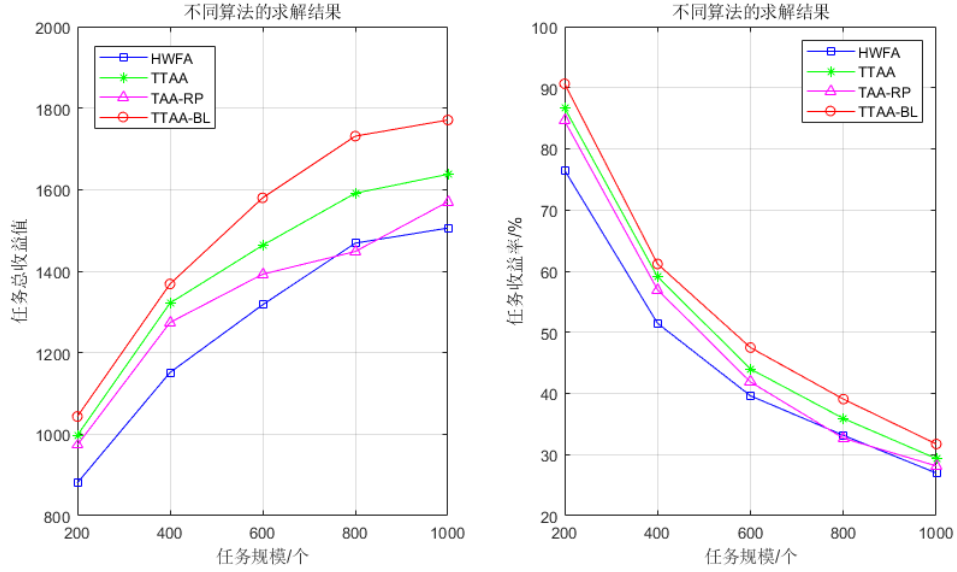


图 4 不同任务分配算法的计算结果

Fig. 4 Computational results of different task assignment algorithms

仿真实验结果表明，在求解空天资源协同任务规划问题时，TTAA-BL 总是优于 HWFA、TTAA 及 TAA-RP。HWFA 算法是一种贪婪算法，缺乏任务分配方案的更新机制，因此由图 4 可以看出，在大多情况下，HWFA 算法的收益值总是最低的。在引入了任务分配方案的更新机制后，结合了禁忌列表策略的 TTAA-TL 总是比没有结合禁忌列表策略的 TTAA 效果要好，说明了禁忌列表策略的有效性。TAA-RP 是一种基于资源优先度的任务分配算法，它认为应该将任务优先分配给资源更加稀缺的卫星去执行，对未被执行的任务再选择灵活程度更高的 UAV 去执行，这个思想可以得到较好的初始任务分配方案，在大多数情况下优于 HWFA 算法得到的初始分配方案，但是在任务分配方案更新时，基于资源优先度的思想，容易使得更有利于 UAV 去执行的任务却分配给了卫星去执行，导致算法过早地陷入了局部最优解，因此 TAA-RP 的效果总是比 TTAA 要差。从图 4 的两幅子图中可以看出，虽然随着任务规模的扩大，任务收益值有着显著的增长，但是任务收益值的增长很明显不如任务总体收益值的增长，因此在任务规模扩大时，HWFA、TTAA、TAA-RP、TTAA-BL 任务收益率之间的差距也越来越小。

接下来分析四种算法中效果最优的算法，TTAA-BL 求解到的最优任务规划方案中，卫星观测平台和 UAV 观测平台的任务完成情况。观测平台指由同类观测资源组成的系统，如卫星观测平台包括所有的卫星子规划中心。

表 3 UAV、卫星观测平台的任务完成情况

Table 3 Tasks completion of UAV and Satellite platform

Case	任务规模	UAV 观测平台		卫星观测平台	
		任务完成数	收益值	任务完成数	收益值
C6	200	104.67	583.92	62.75	459.50
C7	400	112.13	757.13	75.13	611.38
C8	600	120.08	884.89	83.46	694.97
C9	800	128.53	992.20	86.07	739.00
C10	1000	126.50	1011.71	87.64	759.14

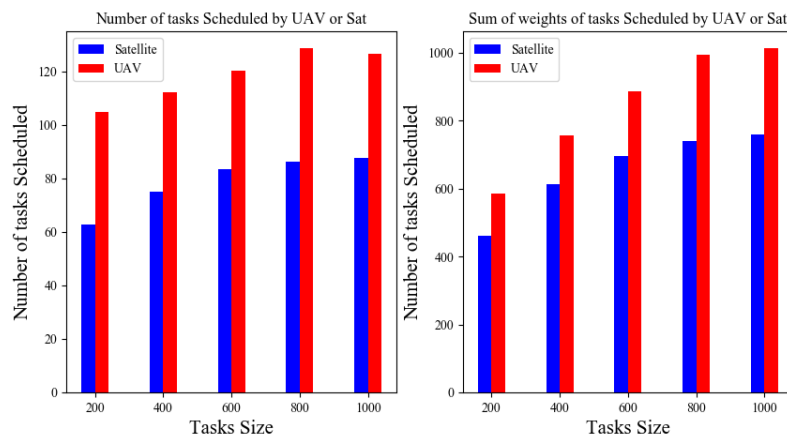


图 5 UAV、卫星观测平台的任务完成情况

Fig. 5 Tasks completion of UAV and Satellite platform

上述结果表明，UAV 观测平台的完成任务数量和任务收益值总是高于卫星观测平台，说明对小区域内目标的观测，UAV 的观测能力比卫星要强。从任务完成数的角度看，UAV 完成任务的数量远高于卫星，但是在任务收益值方面，UAV 完成任务获得的收益值与卫星相比，虽然高于卫星，但是却不如任务完成数相差得那么巨大。当任务规模为 200 时，UAV 完成任务的平均收益为 5.58，卫星完成任务的平均收益为 7.32，相差 1.74；当任务规模逐渐扩大到 400、600、800、1000 时，UAV 和卫星完成任务的平均收益之差逐渐降为 1.39、0.96、0.87、0.66。在任务规模从 200 扩大到 1000 时，卫星从比 UAV 的平均收益高 1.74 下跌至 0.66，说明任务在进行分配时，稀缺资源获得的任务优先级一般较高，而灵活性强的观测资源，安排执行的任务对其优先级要求不是很高，但是该类观测资源对资源的消耗方面要求较高，原则上是越小越好。因此，在任务规模较大时，由于区域内任务密度增大，而且具有较高优先级的任务数增多，这对 UAV 来说，意味着对资源消耗少且优先级较高的任务数增多了，因此 UAV 观测平台的任务收益值随着任务规模的扩大，逐渐拉开了与卫星观测平台的差距。

4. 结论

本文根据分而治之、迭代优化的思想,构建了多 Agent 协同任务规划模型,设计了任务协同分配机制,将任务合理地分配给服务层中的各子规划中心。提出了基于禁忌列表策略的两阶段任务分配方法(TTAA-BL),是一种针对任务分配方案的寻优方法,通过实验仿真验证了模型的合理性,以及证实了该方法的优越性,与 HWFA、TTAA、TAA-RP 算法相比,TTAA-BL 算法效果更好,本研究对未来空天观测资源传感网络的管控提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 李德仁. 论军民深度融合的通导遥一体化 空天信息实时智能服务系统[J]. 军民两用技术与产品, 2018(15):14-17.
- [2] 阮启明, 谭跃进, 李永太, 等. 基于约束满足的多星对区域目标观测活动协同[J]. 宇航学报, 2007,28(1):238-242.
- [3] 贺川, 朱晓敏, 邱滢珊. 面向应急成像观测任务的多星协同调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012,34(4):726-731.
- [4] 田菁. 多UAV协同侦察任务规划问题建模与优化技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2007.
- [5] 王强, 张安, 宋志蛟. UAV协同任务分配的改进DPSO算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2014,26(05):1149-1155.
- [6] 白国庆, 邢立宁, 贺仁杰, 等. 基于协同进化的多平台联合对地观测优化调度[J]. 国防科技大学学报, 2013,35(04):182-188.
- [7] Herold T M, Abramson M R, Kahn A C, et al. Asynchronous, distributed optimization for the coordinated planning of air and space assets: AIAA Infotech at Aerospace 2010, 2010[C].2010.
- [8] 余婧. 空天对地观测资源协同任务规划关键技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.
- [9] Li J, Li J, Zhong Z, et al. Space-air resources multi-phase cooperation task planning approach based on heterogeneous MAS model[J]. Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(7):1682-1697.
- [10] 梁星星. 面向海上移动目标跟踪观测的空天协同任务规划研究[D]. 国防科学技术大学, 2016.
- [11] Wu G, Pedrycz W, Li H, et al. Coordinated Planning of Heterogeneous Earth Observation Resources[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016,46(1):109-125.