基于分治迭代策略的空天资源协同任务规划方法

1. **空天资源协同任务规划问题分析**

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。无人机获取观测目标的流程为：无人机飞抵目标上方，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。

假设有M个任务， 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， 是待观测目标的权重集合。 是待观测目标自带的时间窗， 表示目标最早的开始观测时间， 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。 是待观测目标所需要的持续观测时间。 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



**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，可把其任务规划问题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 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* ()需要的持续观测时间为, 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 由同一架UAV执行观测，UAV在观测完后需要一个转换时间（UAV在的位置飞到的位置需要的飞行时间），才能继续执行，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和任务与基地M+1之间的距离 限制。假设在UAV u下， 为待观测任务的可见时段。其中，表示任务的最早可见时间，表示任务的最晚可见时间。根据UAV的性质，可得



假设为待观测任务在UAV *u*观测下的有效观测时间窗。其中，表示任务的最早开始执行时间，表示任务的最晚执行结束时间。如图1所示。



MUCTPP的优化目标：完成任务获得的总收益值最大。决策变量表示UAV *u*从任务飞往，表示UAV *u*不飞往。



约束条件：

（1）唯一性约束：每个任务只能被执行一次且UAV不能从任务飞到任务。



（2）每一架UAV必须从基地出发，也必须返回基地。



（3）每一个任务的紧前或紧后任务只有1个。



（4）任意两个任务的执行顺序具有唯一性



（5）保证UAV的任务序列和基地构成一个完整的闭合回路。



（6）保证UAV在任何一个任务子集（不包含基地M+1）不形成闭回路。



（7）时间窗约束：UAV只能在任务的有效观测时间窗内执行任务。



（8）持续时间约束：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。



（9）转换时间约束：UAV从一个任务飞到另一个任务需要飞行时间。



（10）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。



（11）存储容量约束：UAV在一个周期内消耗的存储资源不允许超过。



（12）最大能量约束：UAV在一个调度周期内消耗的能量不允许超过。



（13）最大航程约束



**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(Parallel Machine Scheduling with Time Windows, 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进行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 颗观测卫星，安排执行M个分布于不同空间位置的任务（任务集合*T*）。任务*t* ()需要的持续观测时间为, 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 由同一颗卫星执行观测，该卫星在观测完后需要一个转换时间，才能继续执行，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。

设卫星资源为,其中表示卫星的数量。卫星对应的轨道资源为，其中K表示卫星在一个调度周期内绕地圈次。再假设是待观测的任务在卫星的第*j*个轨道上的可见时间窗，其中表示任务可见时间窗的最早可见时间，表示任务可见时间窗的最晚可见时间。

假设为待观测任务在卫星的第*j*个轨道上的有效观测时间窗。其中，表示任务的最早开始执行时间，表示任务的最晚执行结束时间。如图2所示。



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。决策变量表示任务*i*在卫星的轨道圈次上完成，表示不完成。变量表示在轨道圈次上，任务*i*先于任务*h*被完成，否则。



约束条件：

1. 唯一性约束：任务最多只能被执行一次。



1. 时间窗约束：卫星只能在任务的有效观测时间窗内观测。



1. 持续时间约束



1. 任务一旦被执行，则不能被其它任务抢占。



1. 卫星的轨道圈次上，两个不同的任务执行顺序具有先后之分。



1. 转换时间约束



1. 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。



1. 能量约束：卫星在一个调度周期内消耗的能量不允许超过。



**1.3 基于分治策略的多Agent协同任务规划模型**

本文设计了一种基于分治策略的多Agent协同框架，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。基于分而治之的思想，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X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 Agent和多卫星Agent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。



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。



1. **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及剩余观测资源等情况，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，由于任务具有距离和时间窗的约束，以及UAV或卫星具有资源的限制，因此待调度的任务应分配到具有充足资源的观测资源Agent上，并且与观测资源Agent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Agent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Agent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，权重越高的任务，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具有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，在该轨道上不能在任务的时间窗内观测到任务，则任务在该卫星的该轨道圈次无观测机会。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下可能有至少2个有效观测时间窗。对于UAV，任务在该Agent下最多只有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，应尽量选择对原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冲突度。

假设是任务在观测资源*j*上的观测机会集合，其中表示任务在观测资源*j*上的观测机会数量，即有效观测时间窗的数量。设为观测资源*j*上与观测机会对应的已调度任务集，其中表示观测资源*j*上已调度的任务集中与任务在观测机会上可能发生冲突的任务数。对于卫星来说，如果观测机会对应的轨道与卫星观测的轨道不是同一轨道，则不在任务集中。

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，在观测机会上，与任务集中的任务都存在发生冲突的可能性。设任务插入到观测机会与任务发生冲突的可能性为，则任务在观测资源*j*上的冲突度为



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*表示与观测机会对应的UAV，、和 分别表示任务、任务与UAV u基地以及任务和任务之间的距离。表示 *u*的最大飞行距离。如果满足



则意味着*u*不能在一次飞行过程中不能同时完成任务、任务，即任务和任务发生冲突的可能性。

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，*u*在任务的最早开始时间，按任务与任务之间的最短路线，以最大速度 飞到任务位置的时刻超过任务的截止期，则视为必然冲突。如果满足



则意味着在UAV *u*下，任务和任务发生冲突的可能性。

可能冲突：提出一种基于线性规划的思想计算两个任务和发生冲突的可能性大小。对于任务和来说，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，那么任务和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、为任务和的有效观测时间窗，和分别是任务和的持续观测时间。分别是*u*执行任务和的观测时间，那么*u*在执行任务和发生冲突必然遵循下面的规则：



上述约束条件x表示如果*u*先执行任务，假设在时刻执行，那么*u*选择在**时间范围内执行任务就会与任务发生冲突。约束条件x表示*u*先执行任务，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交叉区域来表示，当落在阴影面积内，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：

（1）当两个任务的有效观测时间窗交叉时；



其中，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。





（2）当两个任务的有效观测时间窗不发生交叉且时；





（3）当两个任务的有效观测时间窗不发生交叉且时；





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



则两个任务发生冲突的可能性，否则。

2.1.4 效用函数

在子规划中心，如果任务有更多的观测机会，那么任务就倾向于分配给这个子规划中心。同时，如果任务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，其中表示子规划中心的资源集。效用函数为



其中，表示任务在子规划中心*k*的效用值，表示任务在观测资源*j*下的冲突度。

**2.2 算法流程及框架**

正文应按“引言，主要研究内容与结果、结论”划分为几部分【以1.5倍行距通栏(单栏)排版、小四号宋体(英文用Times New Roman)书写】，稿件还应标注页码以利于编辑和修改。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号；不同层次的数字之间用小圆点相隔，末位数字不加标点符号。如“1”，“1.1”等)

**1 一级标题**

**1.1 二级标题**

1.1.1 三级标题

**图表要求：**

*第一部分引言中不要出现图、表和公式。*

|  |
| --- |
| 图、表和公式中仅使用英文，图题、表题需中英文对应。  一般曲线图或照片图 尺寸以5cm×7cm为宜。照片图给出时(图片像素不低于300像素)，删去不必要的信息，保证图中所有的文字都能看清。坐标图给出所有坐标的物理量和单位。  图、表格随文排。放在文中出现图说明之后。 |

图1 中文图题。(a) 子图1说明; (b)子图2说明; (c)xxx

Fig. 1 Figure title in English. (a) xxx; (b)xxx; (c)xxx

表1 中文表题

Table 1 Table title in English

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表使用三线表 |  | 表随文排 |
| xxxx | xxxx | xx |
| xxxx | xxxx | xx |
| xxxx | xxxx | xx |

参考文献：

(1)期刊： Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu et al.. Design of a new type interleaver[J]. Acta Optica Sinica, 2003,23(12):1424～1428

张娟，刘立人，周煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003,23(12):1424～1428

(2)专著：Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Metrology[M]. Beijing: Science Press,1998,162～165

金国藩，李景镇.激光测量学[M]. 北京：科学出版社,1998.162~165

(3)译著：Born M,Wolf E. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing:Science Press,1978.182～190玻恩，沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京：科学出版社, 1978.182～190

(4)学位论文：Zhang Jing. LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2000,21～30

张景. 激光二极管微振动传感器及其在肌肉振颤测量中的应用[D]. 武汉：华中科技大学, 2000. 21～30

(5)技术标准：National Standardization Technical Committee. GB 3100～3102-93. Quantities and Units GB3100～3102-93[S]. Beijing: China Standard Press,1994

以下内容放在第一页页脚处

**收稿日期：**年-月-日；**收到修改稿日期：**年-月-日

**基金项目：**国家自然科学基金(xxxxxxxx)资助课题。

**作者简介：**姓名（出生年月-），性别，学历，职称，主要从事……方面的研究。E-mail：

 \***通信联系人。**E-mail:

**注意事项**：

1. **中文参考文献需给出相应的英文；多名作者的，姓名给至第三作者。**
2. 关键词应有4~6个，其中关键词的第一个应是该文主要工作或内容所属的二级学科名称，第二个列出该文研究得到的成果名称或文内若干成果的总类别名称，第三个列出该文在得到上述成果或结论时采用的研究方法，第四个列出在前三个关键词中没有出现的，但作为主要研究对象的事或物质的名称，如有需要，还可列出有利于检索和文献利用的第五，六个等关键词。

2.   需提供准确的中图分类号（中文关键词后）

3.    为利于稿件审阅，请于文末提供本文创新点说明。简要说明本文取得的主要创新性成果。

4.     基金资助标识准确。常见基金资助见附录1。

5.      物理量使用单字母符号（可用下标区别）斜体，数字与单位之间要加空格。

6.      中文之间使用中文标点符号，英文之间使用英文标点符号且后面空一格。

7.     常用符号如下：  
数学运算符使用全角符号：＋，－，×，÷，＝，＜，＞，≤，≥，±;  
化学键：—，＝，≡；表示范围：～；比号：∶；中圆点：•；其他：℃，'，°；  
使用希腊字母，插入符号时选择西文字体中的希腊字母。

8. 照片图给出时(图片像素不低于300像素)，删去不必要的信息，保证图中所有的文字都能看清。坐标图请给出所有坐标的物理量和单位。