

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于统一资源编码的成像卫星联合任务规划算法框架

张佳唯, 邢立宁, 张玮, 钱凤臣

引用本文:

张佳唯, 邢立宁, 张玮, 钱凤臣. 基于统一资源编码的成像卫星联合任务规划算法框架[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1497–1504.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1718>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1147–1156 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1193>

### 基于视觉引导多AGV系统的改进A\*路径规划算法

Improved A\* path planning algorithm for vision-guided multi-AGV system

*控制与决策*. 2021, 36(8): 1881–1890 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1670>

### 天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

Planning model and parallel competing memetic algorithm for space-near space-air based cooperative earth observation missions

*控制与决策*. 2021, 36(3): 523–533 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

### 基于动态蚁群劳动分工模型的多AUV任务分配方法

A multi-AUV dynamic task allocation method based on antcolony labor division model

*控制与决策*. 2021, 36(8): 1911–1919 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1312>

### 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

# 基于统一资源编码的成像卫星联合任务规划算法框架

张佳唯<sup>1</sup>, 邢立宁<sup>2†</sup>, 张 玮<sup>1</sup>, 钱凤臣<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 信息通信学院, 西安 710106; 2. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 对于大量的卫星和地面站资源, 随着观测任务与日俱增, 如何高效安排对应的一体化成像数传活动成为提升卫星管控效能的关键. 在综合考虑实际约束的基础上, 建立数学模型详细描述成像卫星联合任务规划问题, 通过采用统一资源编码的思想设计一种简单且易于理解的个体表示方法, 并利用任务有效执行期的潜在冲突关系提出相互冲突任务集的概念以降低问题求解的时间复杂度, 由此生成相应的算法框架. 最后运用多个测试实例验证该框架的有效性, 同时突出其面对大规模算例时可在有限时间内获得高质量解的能力.

**关键词:** 一体化成像数传; 卫星管控; 联合任务规划; 统一资源编码; 相互冲突任务集; 大规模

中图分类号: TP79

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1718

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 张佳唯, 邢立宁, 张玮, 等. 基于统一资源编码的成像卫星联合任务规划算法框架[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1497-1504.

## A united mission planning algorithm framework based on uniform resource encoding for imaging satellites

ZHANG Jia-wei<sup>1</sup>, XING Li-ning<sup>2†</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, QIAN Feng-chen<sup>1</sup>

(1. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China; 2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** For a large number of earth observation satellites as well as ground station resources, how to effectively arrange the integrated imaging and data transmission activities plays a crucial role in improving the satellite management efficiency with the increasing quantity of observation missions. Based on comprehensive consideration of practical constraints, a mathematical model is established to describe the imaging satellite united mission planning problem in detail. A simple as well as comprehensible individual representation method is designed by adopting the idea of uniform resource encoding, and the conception of conflicting mission sets is proposed by utilizing the potential conflict relationship of the effective execution period for each mission to reduce the time complexity of solving this problem, thereby generating the corresponding algorithm framework. Finally, test instances demonstrate the effectiveness of the algorithm framework, which also shows its ability to obtain high-quality solutions within a limited time period for the large scale optimization instances.

**Keywords:** integrated imaging and data transmission; satellite management; united mission planning; uniform resource encoding; conflicting mission set; large scale

## 0 引 言

成像卫星是利用星载传感器对地球表面和低层大气进行探测以获取有关信息的一类卫星, 其主要任务是对地面特定目标进行成像, 并将所获得的数据实时传输至地面站(记为“实拍实传”), 或是先记录在星载存储器上然后回传至地面站(记为“存储转发”). 成像卫星联合任务规划是指在给定的规划周期内选出将要观测的目标, 在满足实际约束条件的基础上为其

安排对应的卫星成像和地面站接收资源以及执行时间窗, 以最大化满足用户需求.

当前, 由于一体化考虑多星成像数传活动的难度较大, 在学术研究以及工程实践中常将卫星成像和卫星数传两个阶段进行独立求解, 以此降低联合任务规划的复杂性. 仅针对单一的卫星成像或数传规划问题而言, 目前已研究出许多成熟高效的算法, 其中包括精确求解算法(分支定界法<sup>[1]</sup>、动态规划算法<sup>[2-3]</sup>)、

收稿日期: 2020-12-09; 录用日期: 2021-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773120).

责任编委: 梁樑.

†通讯作者. E-mail: xinglining@gmail.com.

启发式算法(灵活度越小越优先<sup>[4]</sup>、冲突度越大越优先<sup>[5-6]</sup>、邻域搜索<sup>[7-8]</sup>、深度优先<sup>[9]</sup>)以及智能优化算法(遗传算法<sup>[10-13]</sup>、蚁群算法<sup>[14-16]</sup>)。然而随着航天事业的发展,在轨卫星的数目不断增加,成像与数传这两类活动之间的强耦合性进一步提升,传统的分离式规划方法已无法满足用户日益增长的数据需求。在实际过程中,数传活动的规划结果决定了星载存储器空间的释放时间,从而影响到后续成像过程的活动序列;同时,成像活动的规划结果又决定了星载存储器空间的占用程度,进而影响到后续数传过程可接收的成像数据量。例如,在成像规划阶段若所安排的活动在数传阶段由于存储资源受限出现冲突,则必须删除相关任务以保证最终规划方案的可行性,这会导致方案容易陷入局部最优状态,极大地影响了算法的最终结果。因此,开展成像卫星联合任务规划算法的研究对于提高卫星系统整体效益具有极高的现实意义。

目前为止,学术界出现了一些有关成像卫星联合任务规划算法的研究。文献[17]利用一种变体形式的收发问题模型描述成像卫星联合任务规划问题,并给出了其约束规划与禁忌搜索相结合的求解方法。文献[18]将成像卫星联合任务规划问题归结为特殊的多时间窗约束车辆装卸问题,提出基于动态装载概率模型并估算总装载量的启发式搜索任务规划算法。文献[19]考虑卫星载荷具备连续侧摆能力和多种数据压缩模式的新特点,设计了卫星连续侧摆成像规划算法和基于任务优先级的数传任务调度算法。文献[20]建立了成像卫星联合任务规划问题的变体形式车辆路线问题模型,并提出一种变邻域禁忌搜索算法。此后,针对该问题以及类似变体问题,其他一些方法<sup>[21-24]</sup>也相继被提出。

上述研究有以下几点不足:1)问题模型中的约束条件考虑不足,模型设计较为简单,如仅加入存储容量约束未考虑电量约束;2)仅侧重于采用存储转发的形式,忽略了实拍实传这一重要模式;3)规划算法设计过于复杂,工程应用上复现性较差,效果不佳;4)规划算法设计缺乏普适性,如绝大多数研究以单个完整的可见时间窗为资源单位或未规定任务时效期。为了克服上述缺点,本文根据卫星成像数传一体化的协同特性,完整地梳理出成像卫星联合任务规划问题的实际约束,建立对应的数学模型。同时采用统一资源规划的思想设计一种简单且易于编解码的个体表示方法,引入相互冲突任务集的概念以减小问题求解的时间复杂度,并在此基础上提出了相应的算法框架。最后通过实验验证了所提出方法的有效性。

## 1 成像卫星联合任务规划问题模型

本文研究的成像卫星联合任务规划问题主要针对参与规划的可见光卫星,面向大量待成像的观测任务,在满足星载传感器侧视能力、存储容量、数据传输和能量约束的前提下,确定每颗卫星的成像动作序列和数传动作序列以及每个地面站的数传接收序列,使最终完成的总任务数最大。

### 1.1 参数定义

为了更好地描述成像卫星联合任务规划问题,定义如下符号:

$R = \{1, 2, \dots, i, \dots, N_R\}$ : 待观测任务集合;

$S = \{1, 2, \dots, j, \dots, N_S\}$ : 卫星集合;

$G = \{1, 2, \dots, k, \dots, N_G\}$ : 地面站集合;

$Date_i = [st_i, et_i]$ : 任务*i*的有效执行期,  $st_i$ 、 $et_i$ 分别为最早开始时间和最晚截止时间;

$dur_i$ : 任务*i*所要求的有效观测时长;

$p_i$ : 任务*i*的优先级;

$C_j = \{C_j^s, \dots, m, \dots, C_j^e\}$ : 卫星*j*在调度周期内的轨道圈次,  $C_j^s$ 、 $C_j^e$ 分别为最小和最大轨道圈次;

$M_{max}$ : 卫星的最大星载存储容量;

$dM$ : 卫星单位时间成像占用的存储容量;

$E_{max}$ : 卫星单个圈次内的最大可用电量;

$dE$ : 卫星单位时间成像或数传消耗的电量;

$v$ : 接收链路等效速率(仅针对存储转发方式),表示卫星每*v*个单位时间的成像数据需要一个单位时间来接收;

$T_{sob}$ : 同一颗卫星连续执行两个成像活动的过渡时长;

$T_{str}$ : 同一颗卫星针对不同地面站连续执行两个数传活动的过渡时长;

$T_{gtr}$ : 同一个地面站连续接收来自两颗不同卫星数传活动的过渡时长;

$T_{idt}$ : 同一颗卫星连续执行成像活动和数传活动之间的过渡时长;

$ITW_{ij}^m = [ist_{ij}^m, iet_{ij}^m]$ : 任务*i*与卫星*j*在其第*m*个轨道圈次的成像可见时间窗;

$TTW_{jk}^m = [tst_{jk}^m, tet_{jk}^m]$ : 地面站*k*与卫星*j*在其第*m*个轨道圈次的数传可见时间窗;

$Real_{ijk}$ : 二元变量,如果卫星*j*通过地面站*k*对任务*i*进行实拍实传,则其值为1,否则为0。

### 1.2 模型建立

#### 1.2.1 决策变量

决策变量为

$$x_{ij}^m = \begin{cases} 1, & \text{任务}i\text{在卫星}j\text{的第}m\text{个轨道圈次被观测;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$y_{ijk}^m = \begin{cases} 1, & \text{任务}i\text{在卫星}j\text{的第}m\text{个轨道圈次通过} \\ & \text{地面站}k\text{被下传;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$RIW_i = [\text{rist}_i, \text{riet}_i], RTW_i = [\text{rtst}_i, \text{rtet}_i].$$

其中:  $RIW_i$  为任务  $i$  对应的具体成像执行时间窗,  $RTW_i$  为任务  $i$  对应的具体数传执行时间窗.

### 1.2.2 模型假设

1) 不考虑卫星和地面站运行中的突发故障问题, 即其在整个调度过程中均能保持正常运行;

2) 不考虑误码率等技术方面的影响, 假设在数传过程中只要提供满足要求的数传时间, 指定任务的数据便能下载到地面站;

3) 不考虑太阳高度角、云量等级等约束条件, 超出卫星观测能力范围的观测时间窗口已经被删除;

4) 任务具有独立性, 每一个任务与其他任何任务之间无相关性, 一旦开始执行便不可被抢占.

### 1.2.3 数学模型

1) 优化目标: 最大化完成任务的总数, 即在任务有效期内成功被观测并下传至地面站, 有

$$\max \left[ \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{k=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_S} \sum_{m_1=C_j^e}^{C_j^e} \sum_{m_2=C_j^e}^{C_j^e} (x_{ij}^{m_1} \cdot y_{ijk}^{m_2}) \right]. \quad (1)$$

2) 资源选择约束:

① 每个任务最多被安排一次成像和一次数传, 即

$$\forall i \in R,$$

$$\sum_{k=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_S} \sum_{m_1=C_j^e}^{C_j^e} \sum_{m_2=C_j^e}^{C_j^e} (x_{ij}^{m_1} \cdot y_{ijk}^{m_2}) \leq 1. \quad (2)$$

② 必须满足任务所要求的有效观测时长, 即

$$\forall i \in R, \text{dur}_i \leq \text{riet}_i - \text{rist}_i. \quad (3)$$

③ 所有成像活动必须在卫星的成像可见时间窗内执行, 即

$$\forall i \in R, j \in S, m \in C_j,$$

$$(x_{ij}^m = 1) \cap (\text{ist}_{ij}^m \leq \text{rist}_i \leq \text{riet}_i \leq \text{iet}_{ij}^m). \quad (4)$$

④ 所有数传活动必须在地面站的数传可见时间窗口内执行, 即

$$\forall i \in R, j \in S, k \in G, m \in C_j,$$

$$(y_{ijk}^m = 1) \cap (\text{tst}_{jk}^m \leq \text{rtst}_i \leq \text{rtet}_i \leq \text{tet}_{jk}^m). \quad (5)$$

3) 转换时间约束:

① 一颗卫星任意时刻最多只能执行一项成像活动, 且要满足连续执行两个成像活动的过渡时长, 即

$$\forall i_1, i_2 \in R (i_1 \neq i_2), j \in S, m_1, m_2 \in C_j,$$

$$(x_{i_1 j}^{m_1} \cdot x_{i_2 j}^{m_2} = 1) \cap \{T_{\text{sob}} \leq [\max(\text{rist}_{i_1}, \text{rist}_{i_2}) - \min(\text{riet}_{i_1}, \text{riet}_{i_2})]\}. \quad (6)$$

② 一颗卫星任意时刻最多只能执行一项数传活动, 并且要满足针对不同地面站连续执行两个数传活动的过渡时长, 即

$$\forall i_1, i_2 \in R (i_1 \neq i_2), j \in S, k_1, k_2 \in G (k_1 \neq k_2),$$

$$m_1, m_2 \in C_j,$$

$$(y_{i_1 j k_1}^{m_1} \cdot y_{i_2 j k_2}^{m_2} = 1) \cap$$

$$\{T_{\text{str}} \leq [\max(\text{rist}_{i_1}, \text{rist}_{i_2}) - \min(\text{riet}_{i_1}, \text{riet}_{i_2})]\}. \quad (7)$$

③ 一个地面站任意时刻最多只能支持一项数传活动, 并且要满足连续接收来自两颗不同卫星数传活动的过渡时长, 即

$$\forall i_1, i_2 \in R (i_1 \neq i_2), j_1, j_2 \in S (j_1 \neq j_2),$$

$$k \in G, m_1, m_2 \in C_j,$$

$$(y_{i_1 j_1 k}^{m_1} \cdot y_{i_2 j_2 k}^{m_2} = 1) \cap$$

$$\{T_{\text{gtr}} \leq [\max(\text{rtst}_{i_1}, \text{rtst}_{i_2}) - \min(\text{rtet}_{i_1}, \text{rtet}_{i_2})]\}. \quad (8)$$

④ 对于任意两个不同的任务, 一颗卫星不能同时支持其中一个的成像活动与另一个的数传活动, 并且必须满足连续执行成像活动和数传活动之间的过渡时长, 即

$$\forall i_1, i_2 \in R (i_1 \neq i_2), j \in S, k \in G, m_1, m_2 \in C_j,$$

$$(x_{i_1 j}^{m_1} \cdot y_{i_2 j k}^{m_2} = 1) \cap \{T_{\text{idt}} \leq [\max(\text{rist}_{i_1}, \text{rtst}_{i_2}) - \min(\text{riet}_{i_1}, \text{rtet}_{i_2})]\}. \quad (9)$$

4) 工作模式约束:

① 采用存储转发模式时, 任务的数传执行时间窗必须晚于成像执行时间窗, 即

$$\forall i \in R, j \in S, k \in G, m_1, m_2 \in C_j,$$

$$(x_{ij}^{m_1} \cdot y_{ijk}^{m_2} = 1) \cap [T_{\text{idt}} \cdot (1 - \text{Real}_{ijk}) \leq$$

$$(\text{rtst}_i - \text{riet}_i) \cdot (1 - \text{Real}_{ijk})]. \quad (10)$$

② 采用实拍实传模式时, 任务的成像持续时间与数传持续时间相同, 而采用存储转发模式时, 任务的成像是数传持续时间的  $v$  倍, 即

$$\forall i \in R, j \in S, k \in G, m_1, m_2 \in C_j,$$

$$\text{Real}_{ij}^m = \begin{cases} 1, & (x_{ij}^{m_1} \cdot y_{ijk}^{m_2} = 1) \cap (\text{rist}_i = \text{rtst}_i) \cap \\ & (\text{riet}_i = \text{rtet}_i); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

$$\forall i \in R, j \in S, k \in G, m \in C_j, \\ (y_{ijk}^m = 1) \cap \{\max[v \cdot (1 - \text{Real}_{ijk}), \text{Real}_{ijk}]\} \cdot \\ (\text{rtet}_i - \text{rtst}_i) = \text{riet}_i - \text{rist}_i\}. \quad (12)$$

### 5) 资源容量约束:

①所有卫星在任意时刻占用的星载存储器容量不能超过其最大可用存储容量,即

$$\forall i \in R, j \in S, m \in C_j, \\ \left\{ \sum_{i_1=1}^{N_R} \sum_{m_1=C_j^s}^m \max \left[ 0, \frac{\text{riet}_i - \text{riet}_{i_1}}{|\text{riet}_i - \text{riet}_{i_1}|} \right] \cdot x_{i_1 j}^{m_1} \cdot (\text{riet}_{i_1} - \text{rist}_{i_1}) \cdot \text{dM} - \sum_{k=1}^{N_G} \sum_{i_2=1}^{N_R} \sum_{m_2=C_j^s}^m (\text{riet}_{i_2} - \text{rist}_{i_2}) \cdot y_{i_2 j k}^{m_2} \cdot \max \left[ 0, \frac{\text{riet}_i - \text{riet}_{i_2}}{|\text{riet}_i - \text{riet}_{i_2}|} \right] \cdot \text{dM} + (\text{riet}_i - \text{rist}_i) \cdot \text{dM} \right\} \cdot x_{ij}^m \leq M_{\max}. \quad (13)$$

②所有卫星每圈次使用的电量不得超过其最大可用电量,即

$$\forall j \in S, m \in C_j, \\ \sum_{i_1=1}^{N_R} x_{i_1 j}^m \cdot (\text{riet}_{i_1} - \text{rist}_{i_1}) \cdot \text{dE} + \sum_{i_2=1}^{N_R} \sum_{k=1}^{N_G} y_{i_2 j k}^m \cdot (\text{rtet}_{i_2} - \text{rtst}_{i_2}) \cdot \text{dE} \leq E_{\max}. \quad (14)$$

## 2 算法框架

由于单一的卫星成像或数传任务规划问题早已被证明是NP-Hard<sup>[25]</sup>,针对更为复杂的成像卫星联合任务规划问题,依然不存在多项式时间内的精确求解算法.此时,为了在有限时间内求解此类复杂的优化问题并获得令人满意的解,通常引入以全局搜索为基础的智能优化算法框架,然后对具体的操作算子进行有效改进.其中,遗传算法作为最经典的进化算法之一已被广泛应用于解决各类组合优化问题<sup>[26-27]</sup>,同时在求解单一的卫星成像或数传任务规划问题时也都呈现出较好的性能.

本节根据前文建立的数学模型,将成像卫星联合任务规划问题描述为在可见时间窗内为待观测任务同步分配成像和数传资源的组合优化问题,并以遗传算法的标准框架为基础,采用统一资源规划的思想设计了一种简单且易于编解码的个体表示方法,同时利

用任务有效执行期的潜在冲突关系提出了相互冲突任务集的概念降低问题求解的时间复杂度,以此提高算法框架的通用性和可扩展性.

### 2.1 个体编解码

当前已有的成像卫星联合任务规划算法的编码方式都较为复杂<sup>[21,23]</sup>,而依据编码特性所设计的交叉变异算子也同样随之变得复杂,由此造成了极大的算法复现难度,影响其工程应用能力,且很大程度上会导致算法单次搜索的时间复杂度过高,影响其运行效率.同时,存在有部分编码方式不符合Goldberg所提出的完备性、健全性以及非冗余性3个原则<sup>[28]</sup>.

为了克服上述缺点,考虑按照任务序列采用统一规划成像和数传资源的思想,设计一种简单有效的编解码方式:对于含有 $n$ 个卫星、 $m$ 个地面站的场景而言,每个待观测任务 $i$ 为一个编码位,并对应一个从 $[0, nm - 1]$ 中随机抽取的整数 $v_i$ 作为编码值.此时它可以解码为:将该任务对应的成像活动安排给卫星 $(\text{mod}(v_i, n) + 1)$ 进行观测,然后安排地面站 $(\text{mod}(v_i, m) + 1)$ 执行其数传活动(对于 $m = n$ 的情况,则安排地面站 $(\text{div}(v_i, m) + 1)$ 执行其数传活动),其中 $\text{mod}$ 表示求余运算, $\text{div}$ 表示相除运算(向下取整).如图1所示,假设在包含3个卫星和2个地面站的场景中,任务 $r_1$ 对应基因位的编码值为2,则其可解码为安排卫星 $\text{sat}_3$ 执行成像活动,并安排地面站 $\text{gs}_1$ 执行数传活动.

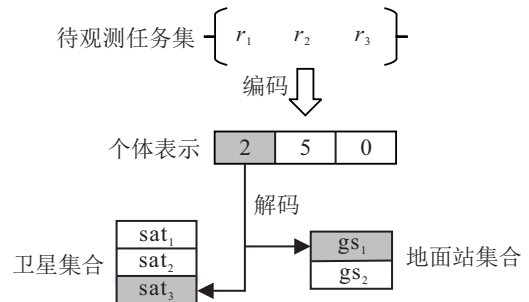


图1 个体编解码示意图

### 2.2 时间窗资源分配

依照上述编解码方式为每个待观测任务分配好具体的卫星和地面站资源后,利用贪婪原则设计最小起始时刻策略(minimum start time, MST)进行成像时间窗的分配,以及最早适应时刻策略(earliest fit time, EFT)进行数传时间窗的分配.其中最小起始时刻策略是指:在所有备选时间窗中选择起始时刻最小且满足有效观测时长的时间段分配给当前成像活动.最早适应时刻策略是指:根据已分配的成像时间窗,借鉴紧前安排的思想,在满足模型约束的前提下从所有备选时间窗上找到最早可用的时间段分配给

当前数传活动。

如图2所示, 设某一任务*i*带有两个成像可见时间窗以及两个数传可见时间窗, 并设其有效观测时长 $dur_i$ 为24 s. 根据前文数学模型中定义的参数符号, 假设该场景中的接收链路等效速率 $v$ 等于2, 所有涉及执行成像或数传活动之间的过渡时长均设为10 s, 此时可计算出任务*i*在存储转发以及实拍实传模式下所需的数传时长分别为12 s、24 s. 由图2可见, 对于MST策略, 在所有4种情况下, 具体的成像执行时间窗都是在所有备选时间窗中选出起始时刻最小的时

间段. 对于EFT策略, 情况(a)表示如果存在实拍实传的机会, 则最早可用的数传执行时间窗即为已确定的成像执行时间窗; 情况(b)、(c)和(d)表示如果只有存储转发的机会, 则将选择所有备选时间窗中的最早可行时段作为最终的数传执行时间窗, 且必须满足

$$\text{数传执行开始时刻} - \text{成像执行结束时刻} \geq 10 \text{ s.}$$

注意到, 每完成一次成像与数传时间窗的分配, 都会根据当前资源使用状况进行一次存储容量和单圈次电量约束的检查. 只有同时满足这两项约束条件, 对应观测任务的调度结果才视为成功.

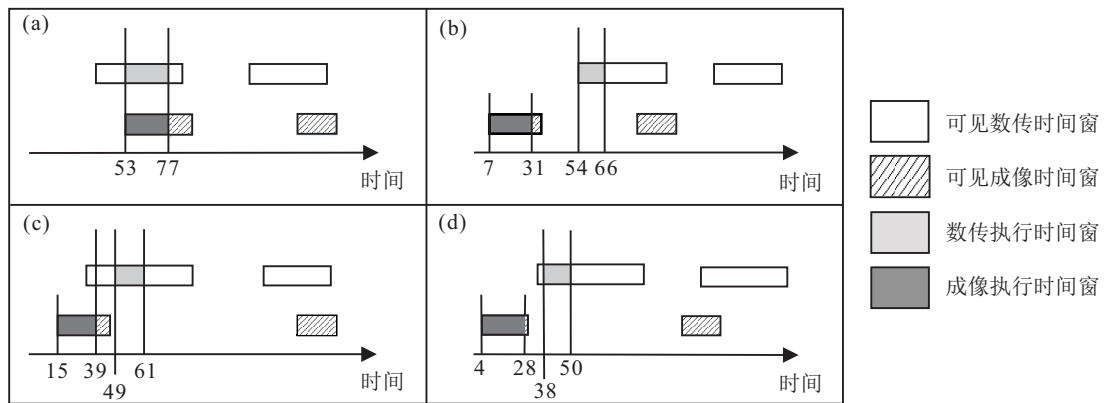


图2 成像和数传时间窗资源分配示意图

### 2.3 算法框架设计

由上述个体编解码以及时间窗资源分配方式可知, 当待观测任务数量过大时, 其个体编码会过长, 从而导致基于全局搜索特性的遗传算法产生过高的运行时间复杂度. 为了改善求解效率, 本节利用任务有效执行期的潜在冲突关系提出相互冲突任务集的概念, 以限定单次迭代的问题规模, 缩短个体的编码长度. 首先介绍相互冲突任务集的概念: 对于待观测任务集合 $CReq = \{i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_N\}$ , 如果满足

$$\forall i_{k_1}, i_{k_2} : \max(st_{i_{k_1}}, st_{i_{k_2}}) < \min(et_{i_{k_1}}, et_{i_{k_2}}), \quad (15)$$

则称 $CReq$ 为一个相互冲突任务集. 引入相互冲突任务集的概念, 可实现在每批次任务规划结束时, 尽可能为后续任务保留较为连续完整的空闲时间窗资源, 有效提升解的质量.

形成的基本算法框架如图3所示, 主要步骤如下.

step 1: 输入待观测任务集*R*和可用时间窗资源.

step 2: 依据各任务优先级与其有效观测时长比值的递减顺序对*R*中所有元素进行排列(确保对优先级较高且有效观测时长较短的任务优先安排资源), 形成初始待观测任务集 $Req$ .

step 3: 初始化相互冲突任务集 $CReq$ 为空集, 取出 $Req$ 中排在首位的元素 $req_1$ 加入 $CReq$ 中, 然后依

次对 $Req$ 中排在 $req_1$ 后面的其余各元素 $req_i$ 执行如下操作: 以任务的有效执行期为基准, 若 $req_i$ 与当前 $CReq$ 中包含的所有任务均存在冲突, 则将其按遍历顺序加入到 $CReq$ 中.

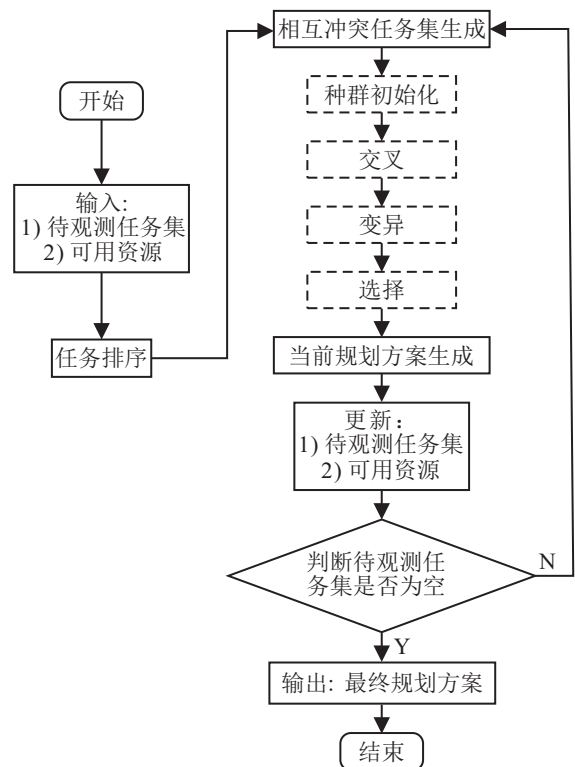


图3 算法框架

step 4: 利用遗传算法对  $CReq$  进行优化求解。

step 5: 根据求解方案更新剩余待观测任务集  $Req = Req - CReq$  以及对应的可用时间窗资源。

step 6: 判断当前  $Req$  是否为空集, 如果为空集则算法结束运行, 否则转至 step 3。

### 3 仿真实验

由于当前国际上不存在针对成像卫星联合任务规划问题的标准测试算例集, 为了充分验证上述所提算法框架的有效性, 首先通过 STK 的 Connect 模块对 STK 与 Matlab 进行接口配置, 然后利用 Matlab 生成随机测试算例集, 并基于 STK 建立仿真场景。

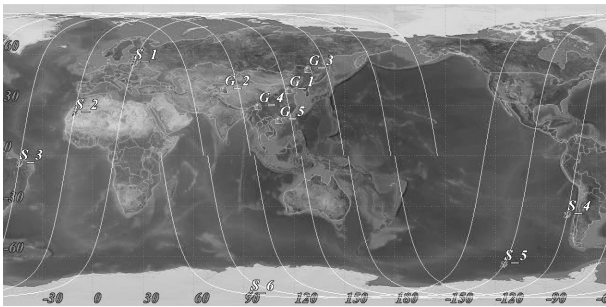


图4 仿真场景示意图

共设计5个场景, scen 1(包含100个任务)、scen 2(包含200个任务)、scen 3(包含500个任务)、scen 4(包含1000个任务)和 scen 5(包含1500个任务), 仿真周期为24 h。如图4所示, 每个场景均包含我国境内相同地理位置的5个地面站( $G_1 \sim G_5$ )和相同轨道参数的6颗太阳同步轨道卫星( $S_1 \sim S_6$ )。每颗卫星携带一个传感器和一根数传天线, 其最大滚动、俯仰和偏航角度分别设置为 $60^\circ$ 、 $60^\circ$ 度和 $0^\circ$ ; 每个地面站配备一根数据接收天线。所有观测任务的基本属性设定为: 1) 优先级由1~10之间随机生成的整数表征, 1为最低优先级, 10为最高优先级; 2) 所要求的有效观测时长由10~30 s之间生成的随机数表示; 3) 有效执行期是在设定的仿真场景时间范围内随机生成, 并保证最晚截止时间大于最早开始时间, 同时保证有效执行期的时长不小于各任务对应随机生成的有效观测时长; 4) 各任务对应目标的经度在西经 $160^\circ \sim$

东经 $160^\circ$ 之间随机生成, 纬度在北纬 $70^\circ \sim$ 南纬 $70^\circ$ 之间随机生成。

基于第2节描述的算法框架, 采用单点交叉算子、单点变异算子以及轮盘赌选择算子建立成像卫星联合任务规划算法, 种群数量设为50, 遗传代数设为200。算法终止条件为: 运行达到最大遗传代数, 或目标函数值连续40代保持不变。作为有效性对比, 引入文献[24]提出的双蚁群算法; 作为通用性对比, 引入经典的模拟退火算法。测试算例在上述5个仿真场景中展开, 每个场景各算法运行50次, 采用目标函数的平均值以及算法运行时间的平均值作为评价指标。

表1所示结果表明, 所提出算法在求解成像卫星联合任务规划问题时具有出色的性能。图5(a)中, 所提出算法在不同规模算例下求出的优化目标均优于双蚁群算法, 这主要是因为双蚁群算法以单个完整的可见时间窗为资源分配单位, 没有考虑其可切割性, 即当待观测任务所需的有效时长相对于整个可见时间窗小得多时, 会导致大段未利用时间窗资源的浪费, 从而间接降低了可观测任务的数量。由图5(b)可以清晰地看出, 所提出算法的求解效率远高于双蚁群算法, 尤其是随着算例规模的增大, 效率差距愈发突出, 这主要是因为双蚁群算法利用单个完整的可见时间窗作为基本搜索单元, 当卫星和地面站数量有所增加时, 巨大的搜索空间便随之产生, 由此导致极高的时间复杂度。综上表明, 所提出基于统一资源编码的算法框架在求解成像卫星联合任务规划问题是有效的; 同时, 归功于相互冲突任务集这一概念的设计, 使得在面对大规模实例时, 该框架具备可在有限时间内获得高质量解的能力。

此外, 模拟退火算法的求解质量相对于所提出算法存在一定程度的下降, 这主要归功于遗传算法框架所具备的群体智能搜索特性, 它能够更好地适应解空间较大的优化问题。总体而言, 优化目标值的量级相差不大, 处于合理范围内。当然, 以种群为单位进行搜索会在一定程度上增大计算复杂度, 不过就实验结果而言, 两类算法的运行时间之差处于可接受的范围

表1 仿真实验结果统计

场景	规模	优化目标平均值			运行时间平均值/s		
		双蚁群算法	模拟退火算法	本文算法	双蚁群算法	模拟退火算法	本文算法
scen 1	100	71.96	76.18	82.32	181.23	160.25	118.75
scen 2	200	140.53	150.41	159.35	774.96	316.70	424.38
scen 3	500	352.38	354.53	375.14	4 871.68	809.58	1 047.43
scen 4	1 000	613.31	629.77	641.65	16 734.82	1 922.91	2 273.71
scen 5	1 500	927.87	904.69	962.88	27 141.49	2 849.18	3 245.18

内,这也间接证明了相互冲突任务集这一概念的积极作用. 对比双蚁群算法发现,模拟退火的求解质量是普遍占优的,即使是在scen 5中也只有很小的差距,而且在求解时间和效率上远胜于双蚁群算法. 综上所述,本文设计的个体编解码方式、资源分配方式以及相互冲突任务集概念用于其他优化算法时,也能够展现出不错的求解性能,表明其具备良好的通用性.

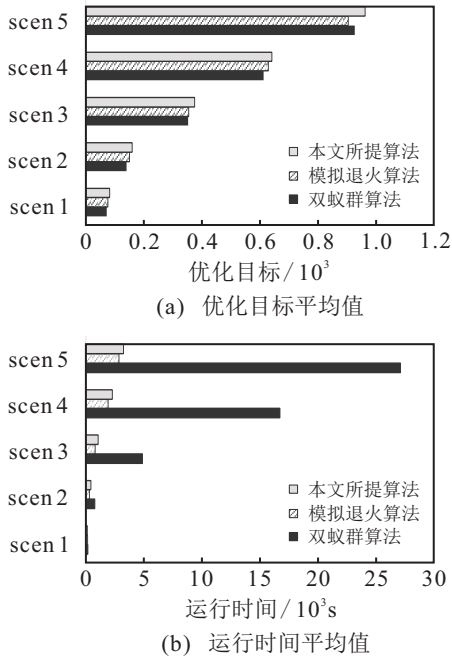


图5 仿真实验结果

## 4 结论

针对复杂的成像卫星联合任务规划问题,本文首先构建其数学模型;然后设计基于统一资源编码思想的个体表示方法,并提出相互冲突任务集的概念,生成求解算法框架;最后通过实验验证该框架的优越性能. 此框架虽是基于标准的遗传算法,但其中所设计的个体表达方法以及编码长度限定方式同样能够有效应用于其他经典优化方法,如差分进化算法、多目标进化算法等,显示出其良好的通用性和扩展性. 同时,所设计的时间窗资源分配方式考虑了时间窗的可切割性,即不仅对可见时间窗较短的低轨卫星适用,对时间窗较长的高轨卫星同样适用,显示了其良好的普适性.

在未来的工作中,将基于此框架进一步探索更有效的方式提升求解效率,例如设计高效的求解算子,或者尝试集成深度学习的一些知识.

## 参考文献(References)

[1] 王沛, 李菊芳, 谭跃进. 编队卫星对地观测调度问题模型比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1689-1694.

(Wang P, Li J F, Tan Y J. Comparison of earth observation scheduling model for satellite formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(8): 1689-1694.)

[2] 向云武, 章文毅, 田妙苗. 卫星数据传输全流程调度及优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1288-1293.

(Xiang Y W, Zhang W Y, Tian M M. Satellite data transmission integrated scheduling and optimization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1288-1293.)

[3] Peng G S, Song G P, Xing L N, et al. An exact algorithm for agile earth observation satellite scheduling with time-dependent profits[J]. Computers & Operations Research, 2020, 120: 104946.

[4] 李菊芳, 白保存, 陈英武, 等. 多星成像调度问题基于分解的优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(8): 134-143.

(Li J F, Bai B C, Chen Y W, et al. Optimization algorithm based on decomposition for satellites observation scheduling problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2009, 29(8): 134-143.)

[5] 贺川, 邱涤珊, 朱晓敏, 等. 基于滚动优化策略的成像侦察卫星应急调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2685-2694.

(He C, Qiu D S, Zhu X M, et al. Emergency scheduling method for imaging reconnaissance satellites based on rolling horizon optimization strategy[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(10): 2685-2694.)

[6] 张利宁, 黄小军, 邱涤珊, 等. 对地观测卫星任务规划的启发式动态调整算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(30): 241-245.

(Zhang L N, Huang X J, Qiu D S, et al. Heuristic dynamic adjust of task scheduling for earth observing satellite[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(30): 241-245.)

[7] Liu X L, Laporte G, Chen Y W, et al. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time[J]. Computers & Operations Research, 2017, 86: 41-53.

[8] He L, Liu X L, Laporte G, et al. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling[J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 12-25.

[9] 杨正磊, 钟文冬, 席涛, 等. 面向应急需求的成像卫星单任务综合规划[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(9): 2000-2006.

(Yang Z L, Zhong W D, Xi T, et al. Imaging reconnaissance satellites single mission integrated scheduling for emergency requirements[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(9): 2000-2006.)

[10] Khafa F, Herrero X, Barolli A, et al. Evaluation of struggle strategy in genetic algorithms for ground stations scheduling problem[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79(7): 1086-1100.

- [11] 姜维, 庞秀丽. 面向成像卫星组网的群任务规划方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(8): 2154-2162.  
(Jiang W, Pang X L. The group scheduling method for the tasks of imaging satellite network[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(8): 2154-2162.)
- [12] Tangpattanukul P, Jozefowicz N, Lopez P. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 245(2): 542-554.
- [13] Chen H, Zhou Y R, Du C, et al. A satellite cluster data transmission scheduling method based on genetic algorithm with rote learning operator[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver, 2016: 5076-5083.
- [14] 李泓兴, 豆亚杰, 邓宏钟, 等. 基于改进蚁群算法的成像卫星调度方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(6): 1656-1659.  
(Li H X, Dou Y J, Deng H Z, et al. Scheduling of imaging satellites based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(6): 1656-1659.)
- [15] 陈英武, 姚锋, 李菊芳, 等. 求解多星任务规划问题的演化学习型蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 791-801.  
(Chen Y W, Yao F, Li J F, et al. A learnable ant colony optimization to the mission planning of multiple satellites[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(3): 791-801.)
- [16] 严珍珍, 陈英武, 邢立宁. 基于改进蚁群算法设计的敏捷卫星调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3): 793-801.  
(Yan Z Z, Chen Y W, Xing L N. Agile satellite scheduling based on improved ant colony algorithm[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(3): 793-801.)
- [17] 李菊芳, 谭跃进. 卫星观测系统整体调度的收发问题模型及求解[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(12): 65-71.  
(Li J F, Tan Y J. Modeling and solving observation satellites scheduling as a pickup and delivery problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2004, 24(12): 65-71.)
- [18] 郭玉华, 李军, 赵珂, 等. 多星联合任务规划中的启发式求解方法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 652-658.  
(Guo Y H, Li J, Zhao K, et al. A heuristic method for earth observing satellites united imaging scheduling[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 652-658.)
- [19] 靳肖闪. 成像卫星星地综合调度技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.  
(Jin X S. On the integrated scheduling techniques for imaging satellites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.)
- [20] 李菊芳, 贺仁杰, 姚锋, 等. 成像卫星集成调度的变邻域禁忌搜索算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3040-3044.  
(Li J F, He R J, Yao F, et al. Variable neighborhood tabu search algorithm for integrated imaging satellites scheduling problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(12): 3040-3044.)
- [21] Sarkheyli A, Bagheri A, Ghorbani-Vaghei B, et al. Using an effective tabu search in interactive resources scheduling problem for LEO satellites missions[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 29(1): 287-295.
- [22] Spangelo S, Cutler J, Gilson K, et al. Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem[J]. Computers & Operations Research, 2015, 57: 1-16.
- [23] 章密. 基于遗传算法的卫星对地观测与数据下传集成调度问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
(Zhang M. A genetic algorithm for satellite observation and data download integrated scheduling[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.)
- [24] 柴伟杰, 张超. 基于图论的多星综合任务规划双蚁群算法[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 534-539.  
(Chai W J, Zhang C. Double ant colony algorithm of multi-satellite mission planning based on graph theory[J]. Radio Engineering, 2019, 49(6): 534-539.)
- [25] Vazquez A J, Erwin R S. On the tractability of satellite range scheduling[J]. Optimization Letters, 2015, 9(2): 311-327.
- [26] Vallada E, Ruiz R. A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 211(3): 612-622.
- [27] Qing-Dao-er-ji R, Wang Y P. A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(10): 2291-2299.
- [28] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Boston: Addison-Wesley, 1989.

## 作者简介

张佳唯(1994—), 男, 讲师, 硕士, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: jwzhang@nudt.edu.cn;

邢立宁(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: xinglining@gmail.com;

张玮(1977—), 男, 副教授, 硕士, 从事体系工程理论与应用等研究, E-mail: 15399429979@163.com;

钱凤臣(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事装备试验评估理论与应用等研究, E-mail: fchen\_qian@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)