

## 面向区域目标观测的多星自主协同任务规划方法

刘润滋<sup>1</sup>, 丁旭<sup>1</sup>, 王燕妮<sup>1</sup>, 夏文超<sup>2</sup>, 慕桃<sup>1</sup>, 杨清海<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;  
3. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对现有多星自主任务规划方法面对区域目标观测任务时缺乏整体性, 从而造成大量观测资源的浪费问题, 提出了一种面向区域目标观测的多星自主协同任务规划方法。首先, 建立面向区域目标的多星协同观测任务规划模型, 并设计基于合同网的多星自主协同规划框架。其次, 根据该协同框架设计基于动态定价的招标机制、投标机制和评标机制, 从而实现区域目标任务的多星自主协同规划。最后, 仿真实验证明, 与传统基于单轮招标合同网以及基于固定标价合同网的多星协同规划方法相比, 所提方法的任务收益分别提升了 60.40% 与 29.07%。

**关键词:** 区域目标任务; 多星自主协同; 合同网协议; 任务规划

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00373

## Onboard coordinated task planning for multi-satellite autonomous to observe area target

LIU Runzi<sup>1</sup>, DING Xu<sup>1</sup>, WANG Yanni<sup>1</sup>, XIA Wenchao<sup>2</sup>, MU Tao<sup>1</sup>, YANG Qinghai<sup>3</sup>

1. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

3. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract:** The existing multi-satellite autonomous task planning methods lack of considering the integrity of area targets observation, resulting in the waste of a large number of observation resources. To solve this problem, an onboard coordinated task planning for multi-autonomous satellite to observe area targets was proposed. Firstly, a multi-satellite coordinated observation task planning model for area targets was established, and a multi-satellite autonomous coordinated planning framework based on contract network. Subsequently, based on this coordinated framework, the dynamic pricing-based bidding, tendering, and bid evaluation mechanisms were designed to realize the multi-satellite autonomous coordinated planning for the tasks of observing area targets. Finally, the simulation results show that, compared to the traditional multi-satellite coordinated planning method based on single-round bidding contract network and fixed price bidding contract network, the task revenue of the proposed method is increased by 60.40% and 29.07%, respectively.

**Key words:** area target task, multi-satellite autonomous coordination, contract network protocol, task planning

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2024-06-15

通信作者: 王燕妮, wangyanni@xauat.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61701365, No. 61971327); 中国科协青年人才托举工程项目 (No. 2022QNRC001); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No. 2023-JC-YB-566, No. 2023-JC-YB-542); 陕西省高校科协青年人才托举计划 (No. 20200112); 陕西省博士后科研项目 (No. 2018BSHEDZZ47)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61701365, No. 61971327), Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No. 2022QNRC001), The Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2023-JC-YB-566, No. 2023-JC-YB-542), Young Talent Fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi Province, China (No. 20200112), Postdoctoral Foundation in Shaanxi Province of China (No. 2018BSHEDZZ47)

## 0 引言

对地观测卫星利用星载传感器获取地球表面的信息,具有不受地理条件限制、观测时间长、覆盖范围广等优点<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用于土地资源普查、抗灾救援、军事侦察等多个领域<sup>[3]</sup>。随着人工智能与航天科学技术的发展,对地观测卫星的星上计算与处理能力不断增强,进而具备了自主决策、自主通信协调、自主调度规划的能力,可根据动态环境自主进行任务规划<sup>[4]</sup>。相比于传统地面任务规划模式,卫星自主规划不但能够及时响应随时到达的观测需求,还能缩小地面站规模,节约运营成本,降低星地间的信息交互需求<sup>[5]</sup>,已成为近年来的研究热点。

现阶段对地观测卫星自主规划的相关工作主要集中于面向点目标的单星<sup>[6-7]</sup>或多星自主协同规划<sup>[8-14]</sup>。例如,文献[6]提出了一种混合的在线调度方法,通过启发式算法求解单个自主对地观测卫星的实时任务调度问题。文献[7]建立了单个敏捷卫星紧急任务自主规划模型,针对任务的不同特点提出了3种任务的快速插入方法。与单星自主任务规划相比,多星协同任务规划更适应复杂多变的任务需求。例如,文献[11]通过自适应遗传算法将问题分解为一个主卫星系统协同调度多个子卫星系统的任务规划问题。文献[12]使用基于支持向量机的卫星任务特征选择方法解决多星自主协同规划问题,提出了多种任务分配策略。集中式协同任务规划对主星的计算能力要求较高,且主星一旦发生故障则系统的性能将大打折扣。因此,去中心化的分布式任务规划在解决多星自主任务规划问题中更具优势。文献[13]提出了动态分布式协作架构,采用一种改进的合同网实现多星自主协同调度问题。文献[14]提出了一种自上而下的分布式协同框架,在此基础上,采用合同网实现多星自主协同调度问题。

与点观测目标相比,大型区域目标的快速观测尤为困难<sup>[15]</sup>,尽管现有工作可以解决点目标的多星自主协同规划问题,但面对区域目标观测任务,简单地将区域目标任务分解为多个点目标再由各卫星系统独立规划的方法<sup>[16-17]</sup>,忽略了区域目标整体需求,导致部分区域目标观测比例不满足用户的最低需求,从而造成大量观测资源的浪费。因此,亟须

研究一种面向区域目标观测的多星自主协同任务规划方法。

本文提出了一种面向区域目标观测的多星自主协同任务规划方法。首先,建立面向区域目标的多星协同观测任务规划模型。其次,设计基于合同网的多星自主协同规划框架,通过分解区域目标的多轮招标、投标实现多星任务规划。在此基础上,设计基于动态定价的招标机制、投标机制和评标机制,在保证区域目标观测比例的同时提高网络整体收益。最后,通过仿真验证本文提出的面向区域目标观测的多星自主协同任务规划方法的有效性。

## 1 系统模型

### 1.1 场景描述

多星自主协同场景如图1所示,由具有自主规划能力的对地观测卫星和区域目标构成。对地观测卫星集合表示为 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots\}$ ,其中, $s_i$ 表示第*i*颗对地观测卫星。对地观测卫星之间可以通过中继卫星或直接建立链路进行实时通信。对地观测卫星具有较强的星载计算能力,可以直接接收用户提交的观测任务请求和其他对地观测卫星提交的协作观测请求,并根据自身资源状况完成在轨自主规划,实现对随机到达的动态观测任务的快速响应。

对地观测卫星沿轨道绕地运行,在地面的投影点形成一条星下点轨迹,其所拍图像是一个与星下点轨迹相平行的条带状区域。不同对地观测卫星设备具有不同的成像侧摆角范围,对每个成像侧摆角范围进行离散化处理,得到一组侧摆成像角度值,每个侧摆成像角度值对应一条观测条带。

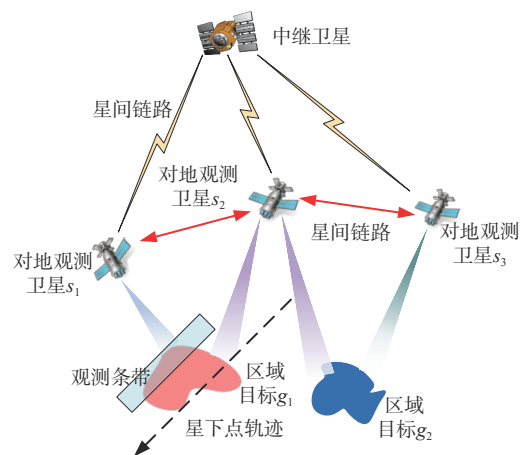


图1 多星自主协同场景

## 1.2 任务模型

用  $OM = \{om_1, om_2, \dots, om_n, \dots\}$  表示区域目标观测任务集合，每个任务用一个五维元组表示，以第  $n$  个区域目标观测任务为例， $om_n = [g_n, b_n, st_n, et_n, \tau_n]$ ，其中， $g_n$  表示任务  $om_n$  的待观测区域目标， $b_n$  表示任务  $om_n$  的区域目标  $g_n$  被完全观测后获得的收益， $[st_n, et_n]$  为任务  $om_n$  的可行调度窗口，即  $st_n$  和  $et_n$  分别表示任务  $om_n$  的最早开始时间和最晚结束时间， $\tau_n$  为负责任务  $om_n$  的对地观测卫星的序号，即任务  $om_n$  被用户提交给对地观测卫星  $s_{\tau_n}$ 。

对于较大的地面区域目标，单颗对地观测卫星一次过境时，通常无法对其完全覆盖<sup>[8]</sup>。因此，为了便于对区域目标拆分观测，根据经纬度将其分割成一组单元格，使每个单元格的尺寸足够小，能够被所有的对地观测卫星在一次成像拍摄中完全覆盖<sup>[9]</sup>。区域目标分解如图2所示，主要分解过程如下：首先，确定区域目标的经度和纬度的最大值和最小值；其次，获得4个极值后确定极值形成的矩形；最后，根据经度和纬度采样间隔将矩形划分为多个单元格。

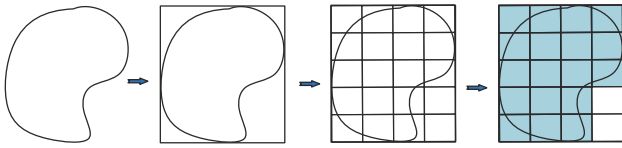


图2 区域目标分解

区域目标  $g_n$  划分后的单元格集合用  $G_n = \{g_{n,1}, g_{n,2}, \dots, g_{n,i}, \dots\}$  表示，其中， $g_{n,i}$  表示区域目标  $g_n$  划分后的第  $i$  个单元格。基于被拆分的区域目标，任务  $om_n$  被拆分为若干子任务以便多星协同观测。任务  $om_n$  的子任务集合用  $OM_n = \{om_{n,1}, om_{n,2}, \dots, om_{n,i}, \dots\}$  表示，其中， $om_{n,i}$  表示区域目标任务  $om_n$  的第  $i$  个子任务。具体地，子任务  $om_{n,i} = [g_{n,i}, st_n, et_n, \tau_n]$ 。

对于任务  $om_n$ ，如果其区域目标  $g_n$  被完全观测，则对地观测卫星  $s_{\tau_n}$  可以获得全部收益  $b_n$ 。然而空间网络中观测资源相对于任务请求是稀缺的，对地观测卫星与区域目标观测任务的规划通常是一个超额订阅的问题<sup>[20]</sup>，并非所有区域目标都可以被完全观测。用  $x_{n,i}$  表示子任务  $om_{n,i}$  是否被观测的决策变量。如果子任务  $om_{n,i}$  在规划周期内至少被一颗对地观测卫星观测，则  $x_{n,i} = 1$ ，否则， $x_{n,i} = 0$ 。用  $u_{n,i}$  表示子任务  $om_{n,i}$  中包含的被拆分的区域目标  $g_{n,i}$  的面积。任务  $om_n$  的实际成像面积表示为

$$\delta_n = \sum_{1 \leq i \leq |G_n|} x_{n,i} \cdot u_{n,i} \quad (1)$$

对于区域目标观测任务而言，若其实际成像比例过低则对用户意义不大<sup>[21]</sup>，因此，区域目标部分观测获得的收益随观测实际成像比例的增大而增大，但并非简单的线性关系。观测收益满足的分段线性函数如图3所示，其收益可通过实际观测面积  $\delta_n$  与区域目标面积  $u_n$  的比值  $f(\delta_n/u_n)$  计算，即对于任务  $om_n$ ，当实际成像面积为  $\delta_n$  时，可获得收益为

$$p_n = b_n \cdot f(\delta_n/u_n) \quad (2)$$

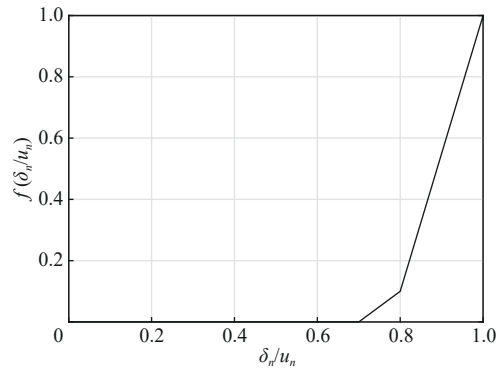


图3 观测收益满足的分段线性函数

## 1.3 问题建模

多星自主协同规划场景中，对地观测卫星通过交互协作请求或应答，自主地调度自身资源，在任务的可行调度窗口内协同完成地面区域目标观测，并获得任务收益。协同规划的目标是最大化全网总收益。将网络规划周期划分为  $K$  个等长的时隙，用布尔变量  $x_{n,i}^{l,k}$  表示对地观测卫星  $s_l$  在第  $k$  个时隙观测子任务  $om_{n,i}$ ，具体为，若对地观测卫星  $s_l$  与子任务  $om_{n,i}$  的可见时隙集合在第  $k$  个时隙内被观测，则  $x_{n,i}^{l,k} = 1$ ，否则， $x_{n,i}^{l,k} = 0$ 。面向区域目标观测的多星自主协同任务规划可以被建模为如下优化问题

$$\begin{aligned} \text{P: } \max \quad & \sum_{1 \leq n \leq |OM|} b_n \cdot f\left(\sum_{1 \leq i \leq |G_n|} x_{n,i} \cdot g_{n,i} / u_n\right) \\ \text{s.t. } \quad & \text{C1: } x_{n,i} = \sum_{1 \leq l \leq |S|} \sum_{k \in \text{TW}(n,i,l)} x_{n,i}^{l,k}, \forall 1 \leq n \leq |OM|, \\ & \quad 1 \leq i \leq |G_n| \\ & \text{C2: } x_{n,i} \leq 1, \forall 1 \leq n \leq |OM|, 1 \leq i \leq |G_n| \\ & \text{C3: } x_{n,i}^{l,k} + x_{m,j}^{l,c} \leq 1, \forall 0 \leq k - c \leq t_z(\varphi_{n,i}^{l,k} - \varphi_{m,j}^{l,c}), \\ & \quad 0 \leq c - k \leq t_z(\varphi_{m,j}^{l,c} - \varphi_{n,i}^{l,k}) \\ & \text{C4: } \sum_n \sum_l \sum_{k \in \text{TW}(n,i,l) \cap T_z} x_{n,i}^{l,k} \cdot (e_o + e_b(\varphi_{n,i}^{l,k})) \leq E_{\max}, \\ & \quad \forall 1 \leq l \leq |S|, 1 \leq z \leq Z \end{aligned}$$

其中，约束条件C1表示决策变量 $x_{n,i}$ 与 $x_{n,i}^{lk}$ 之间的数值关系， $TW(n,i,l)$ 表示对地观测卫星 $s_l$ 与子任务 $om_{n,i}$ 的可见时隙集合与任务 $om_n$ 可行调度窗口内的时隙集合的交集；约束条件C2表示子任务 $om_{n,i}$ 至多只能被一颗卫星观测一次；约束条件C3为观测资源冲突约束，其保证了对地观测卫星 $s_l$ 的两次观测的间隔时间要大于天线侧摆时间， $\phi_{n,i}^{lk}$ 为对地观测卫星 $s_l$ 在第 $k$ 个时隙观测子任务 $om_{n,i}$ 的侧摆角度， $t_z(\phi_{n,i}^{lk} - \phi_{m,i}^{lc})$ 表示对地观测卫星 $s_l$ 从侧摆 $\phi_{n,i}^{lk}$ 角度调整到侧摆 $\phi_{m,i}^{lc}$ 角度花费的时隙个数；约束条件C4为卫星能量约束， $E_{max}$ 表示对地观测卫星 $s_l$ 一个轨道周期中可以消耗的最大能量， $e_o$ 表示对地观测卫星成像一个单元格 $g_{n,i}$ 所消耗的能量， $e_b(\phi_{n,i}^{lk})$ 表示对地观测卫星 $s_l$ 在第 $k$ 个时隙观测子任务 $om_{n,i}$ 侧摆 $\phi_{n,i}^{lk}$ 角度所消耗的能量。

观察问题P可知，其目标为非线性目标，变量为整数变量，因此，多星自主协同规划问题被建模为整数非线性规划问题<sup>[22]</sup>，整数非线性规划是经典的NP难问题<sup>[23]</sup>，为了在多项式时间内分布式地求解问题P，本文基于合同网协议设计了一种分布式协同规划方法。

## 2 基于合同网的多星自主协同规划方法

### 2.1 基于合同网的多星自主协同规划框架

合同网协议是Davis等<sup>[24-25]</sup>提出的关于人物和资源分配的经典协商方法，即基于市场中的招标、投标、评标和中标机制实现任务在多个智能体之间的分布式动态分配。由于其分配效率高、适应动态环境强等特点，合同网协议被广泛应用于面向点目标的多星协同规划问题<sup>[26-27]</sup>。针对自主卫星网络和区域目标观测任务特性，本文对传统合同网协议进行改进，提出一种面向区域目标的分布式多星协同规划机制。与传统合同网机制相比，其优势如下。

- 1) 卫星在招标前基于自身资源状态为待招标任务的部分子任务分配本地观测资源，降低了招标卫星与投标卫星间的协商次数。
- 2) 根据任务完成比例调整待观测子任务的定价，提升区域目标的整体成像比例。
- 3) 考虑了招标卫星与投标卫星之间任务完成目标的不一致性，使招标卫星在收益非负的情况下完成任务规划，同时保证投标卫星获得的收益最大。

基于合同网的多星自主协同规划框架如图4所示，其主要流程如下。

**步骤1** 招标卫星将待观测区域目标任务分解为各卫星可一次成像的若干子任务。

**步骤2** 招标卫星基于本地规划算法检查自身可以完成的子任务，并为可完成的子任务分配观测资源的可用时隙。

**步骤3** 招标卫星更新待招标子任务，并基于动态定价机制为待招标子任务定价。

**步骤4** 招标卫星将待招标子任务封装成招标文件，并将任务信息发送给各投标卫星。

**步骤5** 投标卫星基于任务规划算法判断可以执行的子任务，将同一招标任务依据招标要求整理后生成标书，并向招标卫星发送标书。

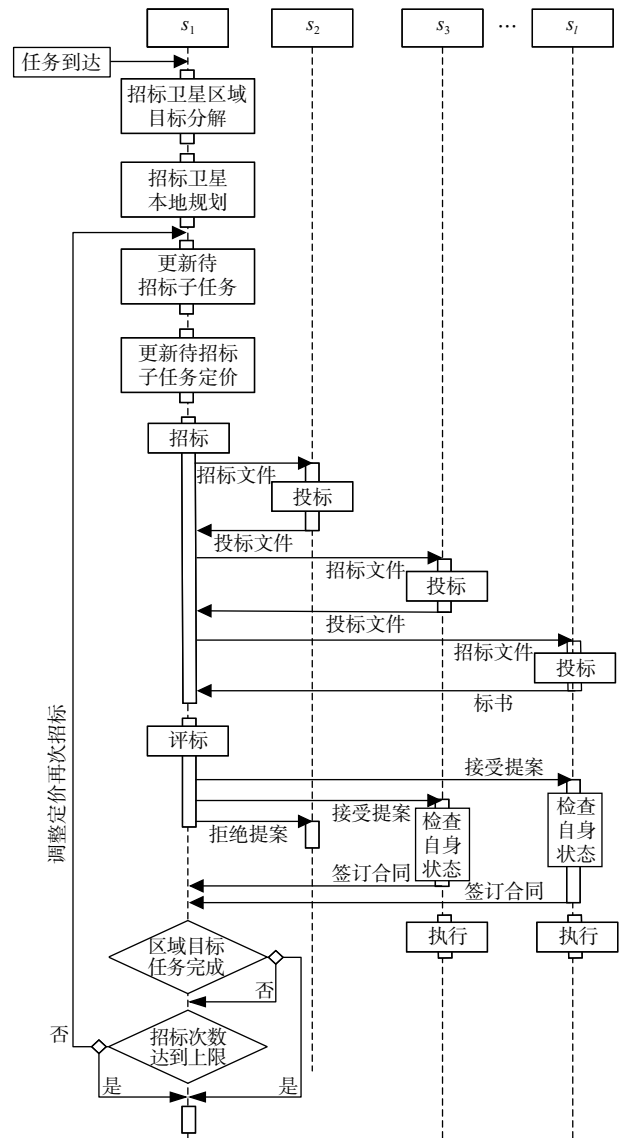


图4 基于合同网的多星自主协同规划框架

**步骤6** 招标卫星在接收到所有标书后使用评标机制选择中标卫星并为其分配子任务。

**步骤7** 招标卫星判断任务是否完成，若是，则招标过程结束，否则招标卫星判断是否达到招标上限，若是，则招标过程结束，否则跳转至步骤3再次招标。

## 2.2 招标卫星本地规划算法设计

在基于合同网的多星自主协同框架中，每颗卫星既可以作为招标方，也可以作为投标方。招标卫星将分解后的子任务信息发送给每个投标卫星，但在任务发布与招标阶段信息交互量大。为了降低卫星之间的交互次数，在开始招标前卫星首先进行本地规划，即招标卫星基于自身资源状态为待观测任务的部分子任务分配本地观测资源，使其可在任务截止时间之前完成观测。具体而言，招标卫星本地任务规划问题是一个在自身剩余资源的约束下最大化可观测的子任务个数问题，其需要判定每个子任务是否可完成，并为可完成的子任务分配观测资源的可用时隙，同时保证为不同子任务分配的时隙没有冲突。招标卫星本地规划算法如算法1所示。

### 算法1 招标卫星本地规划算法

**输入：**待观测区域目标任务  $om_n$  分解后的子任务集合  $OM_n$ 、各待观测子任务的观测目标与卫星  $s_i$  之间的可见时间窗口以及卫星资源状态，卫星剩余能量  $E_{n1}$ 。

**输出：**卫星  $s_i$  可执行子任务序列及其对应开始执行时间集合  $EOM_n = \{(om_{n,i}, t(n,i,l))\}$ 。

初始化:  $EOM_n \leftarrow \emptyset$ ;

**for**  $i=1: |OM_n|$  **do**

  计算子任务  $om_{n,i}$  与  $EOM_n$  的无冲突可行调度时隙集合  $AC(n,i,l)$ ;

**if**  $AC(n,i,l) \neq \emptyset$

    为子任务  $om_{n,i}$  安排可行调度时隙中最早的观测时隙  $t(n,i,l) \in AC(n,i,l)$ ;

    更新剩余能量  $E_{n1} = E_{n1} - e_{n,i}^{t(n,i,l)}$ ;

**if**  $E_{n1} \leq E_{th}$

**break**

**else**

$EOM_n \leftarrow EOM_n \cup \{(om_{n,i}, t(n,i,l))\}$ ;

**end if**

**end if**

**end for**

算法1的主要思路为：首先按照子任务次序，依次选择任务序列中的任务进行调度，然后在避免与已规划任务发生资源冲突的前提下，为子任务分配一个无冲突的可行观测时隙，重复上述过程，直至所有子任务都被尝试分配或能量耗尽。其中， $E_{th}$  表示卫星  $s_i$  的能量门限， $TS_n = \{t(n,i,l), t(n,j,l), \dots\}$  表示卫星  $s_i$  可执行子任务的时隙集合， $AC(n,i,l)$  表示子任务  $om_{n,i}$  与  $TS_n$  的无冲突可行调度时隙集合，其定义为

$$AC(n,i,l) = TW(n,i,l) - (TW(n,i,l) \cap TS_n) \quad (3)$$

卫星  $s_i$  在第  $t$  个时隙完成对子任务  $om_{n,i}$  的观测所消耗的能量为

$$e_{n,i}^{t(n,i,l)} = e_o + e_b(\varphi_{n,i}^{t(n,i,l)}), \quad \forall 1 \leq n \leq |OM|, \quad (4)$$

$$1 \leq i \leq |G_n|, \quad t \in TW(n,i,l)$$

## 2.3 基于动态定价的招标机制

本地规划完成后，招标卫星对自身无法观测的子任务进行定价，将待招标子任务封装成招标文件发送给投标卫星。子任务  $om_{n,i}$  的招标文件用五维元组  $[g_{n,i}, v_{n,i}^m, st_n, et_n, \tau_n]$  表示，其中， $v_{n,i}^m$  表示第  $m$  轮招标时子任务  $om_{n,i}$  被投标卫星完成后招标卫星支付的收益，即标价。接收到投标卫星的标书后，招标卫星通过评标机制为子任务分配投标卫星。对于未被竞标子任务，招标卫星对其调整价格后再次招标。中标卫星完成任务后招标卫星会按照中标价格向其支付部分收益。为了在提升区域目标成像比例的同时保证招标卫星的收益，本文提出了一种动态定价机制，在每轮招标时根据任务完成比例调整招标时每个单元格的定价。具体地，第  $m$  轮招标时招标卫星对子任务  $om_{n,i}$  的定价  $v_{n,i}^m$  表示为

$$v_{n,i}^m = \begin{cases} \frac{0.5b_n}{|OM_n^m|}, & m = 1 \\ v_{n,i}^{m-1} \left( 1 + \alpha \left[ \frac{\delta_n^m}{u_n \beta} \right] \right), & 1 < m \leq M \end{cases} \quad (5)$$

其中， $OM_n^m$  表示任务  $om_n$  第  $m$  轮招标时待招标子任务集合， $\delta_n^m$  表示第  $m$  轮招标时区域目标  $g_n$  的实际成像面积， $\alpha$  和  $\beta$  为两个小于1的常数， $M$  表示招标次数上限。

## 2.4 基于邻域搜索的投标卫星规划算法设计

投标卫星接收到招标信息后根据自身的状态和能力评估在截止时间内可以完成的子任务  $om_{n,i}$ ，若投标卫星经评估后发现子任务  $om_{n,i}$  的招标价格与完

成该子任务所消耗的能量不匹配或者在截止时间内不能完成该子任务,则放弃投标。投标卫星将可以完成的同一招标任务  $om_n$  的所有子任务依据招标要求整理后生成标书,并向招标卫星发送标书。投标卫星  $s_r$  生成的标书可以用一个四维元组表示  $tb_r = [id_r, COM_r, ETD_r, E_r]$ , 其中,  $id_r$  表示投标卫星  $s_r$  的身份信息,  $COM_r$  表示投标卫星  $s_r$  可完成该招标卫星任务  $om_n$  的子任务集合,  $ETD_r$  表示投标卫星  $s_r$  完成各子任务的观测完成时间集合,  $E_r$  表示卫星  $s_r$  完成所有子任务消耗的能量之和。

由于投标卫星的能量限制,其在一个轨道周期内能够完成的观测次数有限<sup>[28-29]</sup>。如果为完成当前招标任务能量资源过早被消耗,可能导致后续高收益任务无法完成。因此,为了投标卫星的长期收益,本文设计了一种基于邻域搜索的投标卫星规划算法,该算法使卫星在决策观测目标时能根据收益能耗比,对待观测任务进行有效筛选,选取那些观测性价比较高的子任务进行观测。卫星  $s_r$  在第  $t$  个时隙完成对子任务  $om_{n,i}$  的观测所消耗的收益能耗比定义为

$$y_{n,i}^{r,t} = \frac{y_{n,i}^{r,t}}{e_{n,i}^{r,t}} \quad (6)$$

基于邻域搜索的投标卫星规划算法如算法2所示。

**算法2** 基于邻域搜索的投标卫星规划算法

**输入:** 待招标子任务集合  $OM'$ 、各招标子任务  $om_{n,i}$  与卫星  $s_r$  之间的可见时间窗口和卫星资源状态。

**输出:** 各区域目标可执行任务序列及其对应开始执行时间集合  $COM$ 。

**初始化:**  $OM_w \leftarrow OM'$ ,  $COM \leftarrow \emptyset$ ;

**while**  $OM_w \neq \emptyset$  **is true**

投标卫星根据式(6)计算所有待观测子任务在各可行调度时隙的收益能耗比;

$i, t \leftarrow \arg \max_{om_{n,q} \in OM_w, k \in BC(n,q,r)} \{y_{n,q}^{r,k}\}$ ;

更新剩余能量  $E_{cl} = E_{cl} - e_{n,i}^{r,t}$ ;

**if**  $E_{cl} \leq E_{th}$

**break**

**else**

$OM_w \leftarrow OM_w - \{om_{n,i}\}$ ;

$COM \leftarrow COM \cup \{(om_{n,i}, t(n,i,r))\}$ ;

**end if**

**end while**

**for each**  $om_{n,i} \in COM$

$NOM \leftarrow OM \cap COM$ ;

构建邻域集合  $NS_1 = \{om_{n,q} \in NOM \mid y_{n,q}^{r,a} \geq y_{n,i}^{r,t}\}$ ;

$NS_2 = \{om_{n,p} \in NOM \mid y_{n,p}^{r,b} < y_{n,i}^{r,t}\}$ ;

从  $NS_1$  和  $NS_2$  中分别随机选择一个子任务

$(om_{n,q}, a(n,q,r))$ 、 $(om_{n,p}, b(n,p,r))$  ( $q \neq p, a \neq b$ ) 或从  $NS_2$  中随机选择两个子任务

$(om_{n,q}, a(n,q,r))$ 、 $(om_{n,p}, b(n,p,r))$  ( $q \neq p, a \neq b$ ) 与子任务  $(om_{n,i}, t(n,i,r))$  进行交换;

**if**  $\{a(n,q,r) \cup b(n,p,r)\} \cap$

$(TB_n - \{t(n,i,r)\}) = \emptyset$

**if**  $f^*(COM) > f(COM)$

$COM \leftarrow COM \cup \{(om_{n,q}, a(n,q,r)),$

$(om_{n,p}, b(n,p,r))\}$ ;

**end if**

**end if**

更新  $COM$  消耗的能量总和  $e_{sum}^r$ ;

**if**  $E_{max} - e_{sum}^r \leq E_{th}$

**break**

**end if**

**end for**

算法2的主要思路为:首先,投标卫星基于待招标子任务在不同时隙调度的收益能耗比生成初始解,在避免与当前解  $COM$  中的子任务发生冲突的情况下,直至所有子任务都被尝试分配或能量消耗尽。其次,基于邻域搜索算法优化当前解,在非当前解  $NOM$  中通过比较当前子任务第  $t$  个时隙的收益能耗比与子任务在各可行调度时隙的收益能耗比的大小构建邻域集合  $NS_1$  和  $NS_2$ ,在此基础上,从  $NS_1$  和  $NS_2$  中分别随机选择一个子任务  $(om_{n,q}, a(n,q,r))$ 、 $(om_{n,p}, b(n,p,r))$  ( $q \neq p, a \neq b$ ) 或从  $NS_2$  中随机选择两个子任务  $(om_{n,q}, a(n,q,r))$ 、 $(om_{n,p}, b(n,p,r))$  ( $q \neq p, a \neq b$ ) 与子任务  $(om_{n,i}, t(n,i,r))$  进行交换。最后,在避免与当前解可行调度时隙发生冲突的前提下,判断总收益能耗比是否提高,重复该过程直至所有子任务都被尝试优化或能量耗尽。 $f(COM)$  表示当前解的总收益能耗比,  $TS_n = \{t(n,i,r), t(n,j,r), \dots\}$  表示当前解的可执行子任务的时隙集合,  $BC(n,i,r)$  表示待招标子任务集合  $OM'$  与  $TS_n$  的无冲突可行调度时隙集

合，其定义为

$$BC(n, i, r) = OM' - (OM' \cap TS_n) \quad (7)$$

$e_{\text{sum}}^r$  表示投标卫星  $s_r$  标书中所有子任务消耗的能量总和，即

$$e_{\text{sum}}^r = \sum_{1 \leq i \leq |G_n|} e_{n,i}^{r,i} \quad (8)$$

## 2.5 多指标综合评标机制

招标卫星接收到投标卫星对任务  $om_n$  发送的标书后，基于评标机制选出各子任务的中标卫星。首先，招标卫星基于评标机制为各竞标子任务  $om_{n,i}$  选出中标卫星，然后，在满足招标次数限制的条件下基于动态定价的招标机制再次对待观测子任务招标。假设区域目标任务  $om_n$  中各子任务  $om_{n,i}$  有多个竞标卫星，评标策略包含如下3种。

1) 区域目标成像总面积最大策略：为了降低观测完成后的传输处理成本，需要使拆分后的区域目标分配尽可能集中，招标卫星优先选择投标子任务多的投标卫星。

2) 最早完成时间优先策略：为了使任务能够尽早完成，招标卫星优先选择那些完成时间最早的投标卫星。

3) 资源消耗最小策略：为了全网的整体收益，招标卫星优先选择能量消耗最小的投标卫星。

综合以上3个评标策略，设计投标卫星  $s_r$  的观测效用函数  $bid_r$ ，即投标卫星可完成子任务的数量除以最晚完成时间与完成各子任务消耗的总能量之和，表示为

$$bid_r = \frac{|COM_r|}{\gamma_1 et_{\text{max}}^r + \gamma_2 e_{\text{sum}}^r} \quad (9)$$

其中， $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为时间、能量的权重因子。 $et_{\text{max}}^r$  表示投标卫星  $s_r$  标书中子任务的最晚完成时间，即

$$et_{\text{max}}^r = \max_{et_i \in ETD_i} et_i \quad (10)$$

为了获得高质量的投标卫星，本文提出一种多指标综合评标机制，该机制对投标卫星进行有效筛选，快速得到局部最优方案。多指标综合评标机制如算法3所示。

**算法3** 多指标综合评标机制

**输入：** 区域目标任务  $om_n$  的全部投标卫星集合  $S$ 、标书的集合  $TB$ 、待招标子任务集合  $OM'_n$ 。

**输出：** 区域目标任务  $om_n$  的中标结果。

**初始化：**  $OM_x \leftarrow OM'_n$ ,  $TB_x \leftarrow TB$ ,  $TB_R \leftarrow \emptyset$ ;

**while**  $TB_x \neq \emptyset$  **is true**

$r \leftarrow \arg \max_{e \in TB_x} bid_e$ ;

$TB_R \leftarrow TB_R + \{tb_r\}$ ;

$TB_x \leftarrow TB_x - \{tb_r\}$ ;

招标卫星  $s_r$  确定投标卫星的标书  $tb_r$ ;

更新  $TB_x$  中剩余标书，将  $tb_r$  中包含的子任务从剩余标书中删除；

$OM_x \leftarrow OM_x - (OM_x \cap COM_r)$ ;

**end while**

算法3的主要思路为：首先招标卫星根据每轮招标接收到的所有标书为各投标卫星计算其观测效用函数  $bid_r$ ，根据观测效用函数  $bid_r$  的最大值确定本次迭代的中标卫星。之后，更新  $TB_x$  中剩余标书，将  $tb_r$  中包含的子任务从剩余标书中删除。重复该过程直到所有的子任务均已被分配或者没有标书可以完成子任务该迭代过程结束。

## 3 仿真测试

为了评估所提出的基于合同网的多星自主协同规划方法的性能，通过 STK (satellite tool kit) 软件搭建仿真场景获得卫星与观测目标之间的可见时间窗口数据，使用 MATLAB 编写算法仿真代码。仿真场景包含 11 颗自主协同规划的对地观测卫星，均位于太阳同步轨道，其轨道高度分布在 705~799 km，轨道倾角为 97.37°~98.75°，成像角度区间为  $[-45^\circ, 45^\circ]$ ，规划周期为 86 400 s。在东经 14.7°~121.5° 和北纬 0°~17.06°、南纬 0°~50.8° 的区域内，按照不同规模、不同地理分布随机生成 11 个区域目标，各区域目标的总观测面积在 98 672.2~196 254 km<sup>2</sup> 之间，各区域目标被完全观测后获得的收益为 [55, 65] 内的随机整数。设定区域目标观测任务在规划周期内随机到达一颗卫星，该卫星为星上自主任务规划时的招标卫星，其余为投标卫星。

为了验证本文所提基于合同网的多星自主协同规划 (CN-MSACP, multi-satellite autonomous collaborative planning based on contract network) 方法的性能，将其与传统集中式方法以及面向点目标的多星自主协同规划方法对比，具体对比方法如下。

1) 集中式多星协同规划方法 (CMSCP, centralized multi-satellite collaborative planning)：假设网络中存在一个理想的协同中心，可以获得全网资源状况和规划周期内的所有任务，利用离线调度的方

式完成任务规划<sup>[30]</sup>。

2) 基于单轮招标的改进合同网协同规划方法 (ICNP, improved contract network planning): 招标卫星将区域目标任务分解并只招标一次<sup>[13]</sup>。

3) 基于固定标价合同网的多轮组合分配方法 (MCAP, multi-round combination allocation planning): 招标卫星对未规划子任务进行再次招标, 但不调整其标价<sup>[14]</sup>。

为了测试招标次数上限对所提算法的性能影响, 对最大招标次数分别为1、2、3和5时, 测试任务总收益的变化, 不同最大招标次数下任务总收益随任务数的变化如图5所示。任务总收益定义为执行给定任务规划后对地观测卫星系统完成的所有任务所获得的收益之和。仿真结果显示, 随着招标次数的增加, 任务总收益均呈现增长趋势, 这是因为招标次数越多, 观测比例越大的区域目标的未被竞标的子任务越容易获得观测资源。招标3次与招标5次的任务总收益最大差距小于3%, 但招标5次所需的控制开销大大增加。因此, 在后续仿真工作中, 将本文所提算法的招标次数固定为3次, 以实现任务总收益和控制开销之间的平衡。

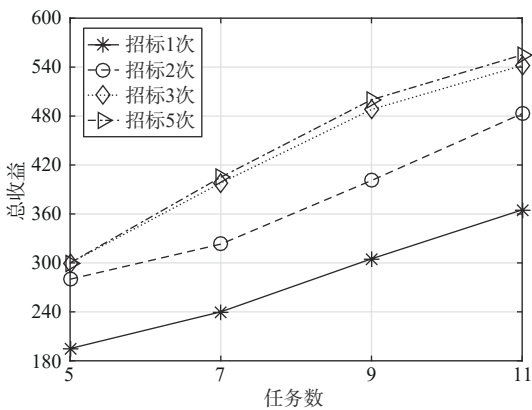


图5 不同最大招标次数下任务总收益随任务数的变化

不同方法下任务总收益随任务数的变化如图6所示。仿真结果显示, CMSCP方法获得了最多的任务收益, 然而由于该方法的实现需要在网络中增加理想的协同中心统一管理隶属于不同单位的各类对地观测卫星, 实现难度较大。本文所提CN-MSACP方法获得的收益非常接近CMSCP方法获得的收益。此外, 所提方法比ICNP、MCAP方法分别有60.40%、29.07%的性能提升。这是因为, 所提方法所采用的多轮招标与动态定价机制能够有效地集中观测资

源, 为那些观测比例高的任务提供更多机会。需要注意的是, 由于ICNP方法仅招标一次, 其控制开销小于本文所提方法和MCAP方法。而本文所提方法与MCAP方法都采用多轮招标, 二者区别仅在于本文所提方法采用动态定价机制, 因此招标次数相同时, 二者控制开销基本一致。

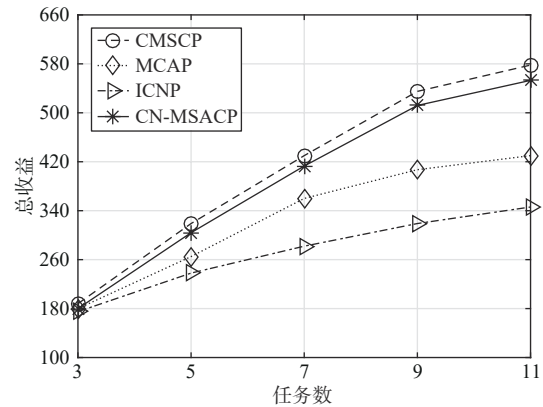


图6 不同方法下任务总收益随任务数的变化

不同方法下区域目标平均覆盖率随任务数的变化如图7所示。仿真结果显示, 本文所提CN-MSACP方法与理想条件的CMSCP方法的最大性能差距不超过2%。此外, 所提方法仍然具有超过95.4%的任务完成率。这是因为所提方法能够基于全局信息更加精准地协调可观测资源完成更多的待招标子任务, 为招标卫星中无法及时观测的子任务提供机会。

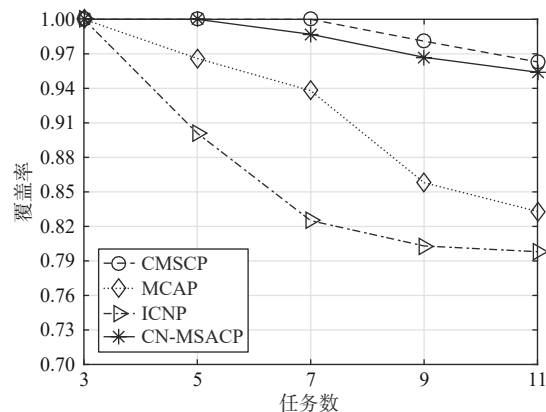


图7 不同方法下区域目标平均覆盖率随任务数的变化

为了进一步揭示所提方法性能增益的来源, 仿真对比了当区域目标任务数为11时不同任务规划方法在各个区域目标任务的覆盖率, 11个区域目标的覆盖率数据见表1。结果显示, 本文所提的CN-

表1

11个区域目标的覆盖率数据

算法类型	任务1	任务2	任务3	任务4	任务5	任务6	任务7	任务8	任务9	任务10	任务11	最大值	最小值	平均值
CMSCP	1.00	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.69	0.97
ICNP	0.96	0.74	0.87	0.71	0.91	0.95	0.57	0.82	0.89	0.93	0.85	0.96	0.57	0.84
MCAP	0.87	0.93	0.84	0.92	0.65	0.74	0.68	0.91	0.77	0.88	0.55	0.93	0.55	0.79
CN-MSACP	1.00	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.67	0.96

MSACP方法将观测资源集中用于目标1至3、5、7至11，上述目标任务完成率达到100%。相比之下，ICNP和MCAP方法采用离散的点目标任务方式协同观测资源，未考虑区域目标的整体性。这导致观测资源的分散使用，无法集中满足用户的最低观测比例，使得部分目标虽被观测过半却无法获得收益。

#### 4 结束语

本文研究了面向区域目标的多星自主协同观测任务规划问题，并在基于合同网的多星自主协同规划框架下设计了3种机制：基于动态定价的多轮招标机制、面向收益能耗比的投标机制和多指标综合评标机制。仿真结果表明，本文所提CN-MSACP方法的任务总收益比ICNP和MCAP方法分别有60.40%和29.07%的提升。该方法能够将有限观测资源集中用于观测比例高的区域目标，保障这些区域目标可以获得绝大部分收益。

#### 参考文献：

- [1] 刘洋, 魏锋, 崔树成, 等. 低轨道卫星通信与物联网应用研究[J]. 物联网学报, 2019, 3(4): 101-108.  
LIU Y, WEI F, CUI S C, et al. Research on the application of LEO satellite communication and Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(4): 101-108.
- [2] ZHOU D, SHENG M, LI J D, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 975-1019.
- [3] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.  
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [4] LI G L. Online scheduling of distributed earth observation satellite system under rigid communication constraints[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(11): 2475-2496.
- [5] DU B, LI S. A new multi-satellite autonomous mission allocation and planning method[J]. Acta Astronautica, 2019, 163: 287-298.
- [6] LI G L, XING L N, CHEN Y W. A hybrid online scheduling mechanism with revision and progressive techniques for autonomous Earth observation satellite[J]. Acta Astronautica, 2017, 140: 308-321.
- [7] SONG Y J, HUANG D J, ZHOU Z Y, et al. An emergency task autonomous planning method of agile imaging satellite[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1): 29.
- [8] WEN J, LIU X L, HE L. Real-time online rescheduling for multiple agile satellites with emergent tasks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(6): 1407-1420.
- [9] ZHENG Z X, GUO J, GILL E. Onboard autonomous mission re-planning for multi-satellite system[J]. Acta Astronautica, 2018, 145: 28-43.
- [10] ZHENG Z X, GUO J, GILL E. Distributed onboard mission planning for multi-satellite systems[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 89: 111-122.
- [11] ZHENG Z X, GUO J, GILL E. Multi-satellite onboard behaviour planning using adaptive genetic algorithm[C]//Proceedings of the 67th International Astronautical Congress. Guadalajara, New York: Curran Associates, Inc. 2016, 6:4049-4055.
- [12] YAO F, LI J T, CHEN Y N, et al. Task allocation strategies for cooperative task planning of multi-autonomous satellite constellation[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(2): 1073-1084.
- [13] YANG W Y, HE L, LIU X L, et al. Onboard coordination and scheduling of multiple autonomous satellites in an uncertain environment[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(11): 4505-4524.
- [14] LIU B J, DENG M, WU G H, et al. Bottom-up mechanism and improved contract net protocol for dynamic task planning of heterogeneous earth observation resources[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(10): 6183-6196.
- [15] XU Y J, LIU X L, HE R J, et al. Multi-satellite scheduling framework and algorithm for very large area observation[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [16] HE L J, LIANG B, LI J D, et al. Balancing coverage and response time in area target scheduling for satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6848-6853.
- [17] SHAO X W, ZHANG Z H, WANG J H, et al. NSGA-II-based multi-objective mission planning method for satellite formation system[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, 8(4): 451-458.
- [18] LU Z Z, SHEN X, LI D R, et al. Multiple super-agile satellite

collaborative mission planning for area target imaging[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023(117): 103211.

- [19] CHEN Y X, XU M Z, SHEN X, et al. A multi-objective modeling method of multi-satellite imaging task planning for large regional mapping[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 344.
- [20] ZHU W M, HU X X, XIA W, et al. A three-phase solution method for the scheduling problem of using earth observation satellites to observe polygon requests[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019(130): 97-107.
- [21] TANGPATTANAKUL P, JOZEFOWIEZ 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.
- [22] CHEN S G. Efficiency improvement in explicit enumeration for integer programming problems[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Piscataway: IEEE Press, 2013: 98-100.
- [23] DENG M, LIU B J, LI S M, et al. A two-phase coordinated planning approach for heterogeneous earth-observation resources to monitor area targets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(10): 6388-6403.
- [24] DAVIS R, SMITH R G. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving[J]. Artificial Intelligence, 1983, 20(1): 63-109.
- [25] DAVIS R, SMITH R G, LEE E M. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving[M]//Readings in Distributed Artificial Intelligence. Amsterdam: Elsevier, 1988: 333-356.
- [26] LONG J, QIAN Z M, XIE F, et al. An improved multi-satellite cooperative task planning method based on distributed multi-agent system[C]//Proceedings of the 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 539-542.
- [27] 靳鹏, 李康. 基于改进合同网协议的分布式卫星资源调度[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3164-3173.
- JIN P, LI K. Distributed satellite resource scheduling based on improved contract network protocol[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(10): 3164-3173.
- [28] WANG X W, WU G H, XING L N, et al. Agile earth observation satellite scheduling over 20 years: formulations, methods, and future directions[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3881-3892.
- [29] 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.
- [30] 李菊芳, 姚锋, 白保存, 等. 面向区域目标的多星协同对地观测任务规划问题[J]. 测绘科学, 2008, 33(S1): 54-56.
- LI J F, YAO F, BAI B C, et al. Cooperative mission planning problem for area targets observation by multi satellites[J]. Science of

Surveying and Mapping, 2008, 33(S1): 54-56.

#### [作者简介]



刘润滋(1988-), 女, 博士, 西安建筑科技大学信息与控制工程学院副教授, 主要研究方向为无线网络、空间网络中的资源管理和性能分析。



丁旭(1996-), 女, 西安建筑科技大学信息与控制工程学院硕士生, 主要研究方向为空间信息网络组网技术。



王燕妮(1975-), 女, 博士, 西安建筑科技大学信息与控制工程学院教授, 主要研究方向为信号检测与识别、数字图像处理。



夏文超(1991-), 男, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为边缘智能无线通信、通感一体化、大规模MIMO等。



慕桃(2000-), 女, 西安建筑科技大学信息与控制工程学院硕士生, 主要研究方向为空间信息网络组网技术。



杨清海(1976-), 男, 博士, 西安电子科技大学通信工程学院教授, 主要研究方向为自主通信、内容交付网络和LTE-A技术等。