

# 基于 Multi-Agent 敏捷卫星动态任务规划问题\*

郝会成, 姜 维, 李一军, 袁子清

(哈尔滨工业大学 管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**在分析敏捷卫星的特点和卫星多用户需求的基础上, 针对敏捷卫星任务规划问题, 基于 Multi-Agent 理论构建了任务分配模型; 针对敏捷卫星任务规划初始方案调度中卫星资源失效的情况给出了敏捷卫星动态任务重调度模型; 在此基础上, 提出了基于诚信机制的可解约合同网任务分配方法, 设计了招投标机制、可解约合同网协议以及招投标、评标策略; 以敏捷卫星任务规划调度问题为例通过实验获得了满意的结果, 表明了模型的合理性以及算法的有效性。

**关键词:**敏捷卫星; 动态规划; 合同网

**中图分类号:** V474.2 + 6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001 - 2486(2013)01 - 0053 - 07

## Research on agile satellite dynamic mission planning based on multi-agent

HAO Huicheng, JIANG Wei, LI Yi jun, YUAN Ziqing

(School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Task allocation model based on Multi-Agent theory was established according to mission planning problem of agile satellite after analysis of agile satellites characteristics and satellite multi-user demand. Agile satellite dynamic task re-scheduling model was proposed for the failure of satellite resources in the agile satellite mission planning initial program scheduling. For obtaining the optimal solution we presented agile satellite dynamic task allocation algorithm based on the agreement ending contract net, and designed bidding mechanism, contract net protocols and strategy of bidding and assessing bidding. Finally, agile satellite mission planning scheduling problem was taken as an example, and satisfactory results were obtained through experiments, which showed that the model was reasonable and the algorithm was efficient.

**Key words:** agile satellite; dynamic planning; contract net

伴随着航天遥感卫星技术的快速发展, 卫星传感器分辨率的提高, 卫星应用范围越来越广, 对空间信息需求的用户也越来越多<sup>[1]</sup>。敏捷卫星能够以俯仰、滚动以及偏航灵活的姿态机动调整能力获得更大范围、更加高效的对地观测能力倍受各国青睐, 成为研究的重点。对敏捷卫星进行任务规划是在有限的规定时间内对任务进行合理分配。在实际观测中每个观测目标与多个敏捷卫星可见, 同时与每个敏捷卫星具有多个可见时间窗可以选择。为解决有限的敏捷卫星资源和广泛的卫星用户需求之间的矛盾, 需要对敏捷卫星资源进行合理分配调度, 以满足不同任务级别、不同目标类型的多用户需求<sup>[2-3]</sup>。

目前国内外的研究中, 针对卫星任务规划问题主要是在静态环境下采用集中式的任务规划方法<sup>[4-5]</sup>。典型的主要有法国 Lemaitre 等针对新一代敏捷卫星 Pleiades 的规划问题, 提出了约束规

划模型, 比较了约束规划、贪婪、动态规划以及局部搜索等四种算法, 并指出了各自的适用范围<sup>[6-7]</sup>。Djamal Habet 和 Michel Vasquez 针对敏捷卫星任务规划问题, 构造邻域时采用了一致饱和和邻域的思想, 提出了禁忌算法对问题进行求解<sup>[8]</sup>。李玉庆构建了敏捷卫星任务规划调度的数学模型, 采用了模拟退火算法和遗传算法相结合的混合遗传算法进行求解策略<sup>[9-10]</sup>。向仍湘研究了敏捷卫星对地观测的工作原理及组织实施过程, 针对不同的任务规模, 设计了不同的求解算法<sup>[11]</sup>。文献[12]基于 Multi-Agent 理论构建了层次化结构的多星任务协商分配方法。王冲在分析卫星约束条件及卫星任务需求特点基础上构建了多星多任务协同规划数学模型, 设计了一种多卫星 Agent 强化学习算法进行求解<sup>[13]</sup>。文献[14]建立了基于心智模型的合同网任务分配模型, 用期望、信念和意图三种心智状态来描述卫星 Agent

\* 收稿日期: 2012 - 09 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(71271066, 71171065); 黑龙江省自然科学基金项目(G201005, 12511435)

作者简介: 郝会成(1980—), 男, 黑龙江肇东人, 博士研究生, E-mail: hmai123@163.com;

李一军(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: liyijun@hit.edu.cn

的行为。Agent 方法特别适合于动态调度,这是因为在任务规划调度中,多星多任务规划主要通过多个 Agent 协商来完成,更多地用并行计算代替串行计算,不是完全的预先集中式规划,因此具有更强的实时性。

以前学者针对敏捷卫星动态任务规划研究得很少。本文在深入分析敏捷卫星特点基础上,重点研究敏捷卫星动态任务规划问题,最大程度满足用户需求,具有重要的理论与现实意义。

## 1 多任务分配模型构建

基于 Multi-agent 理论,将敏捷卫星分为决策敏捷卫星和成员敏捷卫星。决策敏捷卫星负责与各个成员敏捷卫星的通信、协商,并发布观测任务招标信息等事项,其作为任务分配活动的组织者和决策者,拥有共享的任务信息;成员敏捷卫星负责接受由决策敏捷卫星发来的任务需求,根据自身实际情况进行约束评估,决定招标与否,若招标则向决策敏捷卫星提交投标书,否则,放弃投标。

敏捷卫星任务分配问题,可以用五元组描述: $\Xi_r = \langle T, S, C, CNF, TAC \rangle$ , 观测任务集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{N_T}\}$ , 由决策敏捷卫星 Agent 进行管理,  $N_T$  表示待观测的任务总数,  $t_j$  表示分配给成员敏捷卫星 Agent 的观测任务,  $t_j \in T (j = 1, 2, \dots, N_T)$ ; 其中待分配任务集合中的  $t_j$  可以用七元组进行描述:

$$t_j = \langle TL_j, LL_j, LS_j, DT_j, PRI_j, GSD_j^t, TIT_j^t \rangle$$

$TL_j$  代表  $t_j$  标识;  $LL_j$  代表  $t_j$  的坐标信息, 主要包括经度、纬度以及目标高度信息;  $LS_j$  代表  $t_j$  要求的最晚开始时间;  $DT_j$  代表  $t_j$  要求的持续观测时间;  $PRI_j$  代表  $t_j$  的优先级;  $GSD_j^t$  代表  $t_j$  所要求的地面分辨率;  $TIT_j^t$  代表  $t_j$  所要求的成像类型。

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\}$ ,  $S$  是具有能力完成任务集  $T$  的敏捷卫星 Agent 集合,  $S_i$  表示成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ),  $N_S$  为成员敏捷卫星的总数。任何一个成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  可以用六元组进行描述:

$$AS_i^{M_{Agent}} = \langle SL_i, TW_j^{s_i}, SSR_j^{s_i}, POW_j^{s_i}, GSD_i^s, TIT_i^s \rangle$$

$SL_i (i = 1, \dots, N_S)$  代表卫星  $S_i$  的标识;  $TW_j^{s_i}$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  与  $t_j$  的可见时间窗口集合:  $TW_j^{s_i} = \{TW_{j1}, \dots, TW_{j2}, \dots, TW_{jN_T}\}$ , 其中,  $TW_{j2} = \{tw_{j2}^1, \dots, tw_{j2}^k, \dots, tw_{j2}^{N_T}\}$ ;  $tw_{j2}^k$  代表 Agent  $S_i$  与  $t_j$  的第  $k$  个可见时间窗口, 任何一个时间窗口可以用六

元组描述:

$$tw_{j2}^k = \langle s_i, t_j, ST, ET, ELE_{ij}, AZi_{ij} \rangle,$$

其中,  $ST$  代表时间窗口开始时间,  $ET$  代表时间窗口结束时间,  $ELE_{ij}$  代表卫星  $s_i$  执行  $t_j$  的俯仰角,  $AZi_{ij}$  代表卫星  $s_i$  执行  $t_j$  的方位角;  $SSR_j^{s_i}$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  在执行  $t_j$  时所拥有的存储容量;  $POW_j^{s_i}$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  在执行  $t_j$  时所拥有的可用电源量;  $GSD_i^s$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  传感器的图像分辨率;  $TIT_i^s$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  的传感器成像类型。

$C_i$  代表成员敏捷卫星 Agent  $S_i$  完成观测任务集  $T_j$  所付出的成本,  $C_i = \sum_{j=1}^{N_T} c_{ij}$ ;  $CNF = \langle BTmechanism, BTflow, ConNetAgreement \rangle$ ,  $CNF$  代表基于 Multi-Agent 卫星任务规划合同网架构, 其主要包括招投标机制设计, 招投标流程, 基于诚信机制的可解约合同网协议。

$TAC = \langle BStrategy, TStrategy, TEvStrategy \rangle$ ,  $TAC$  代表合同网中的招标、投标和评标策略。

## 2 动态任务重调度模型

卫星失效引起的“解约任务”成为动态任务后需要重新进行调度, 为使得任务安排具有一致性和卫星执行稳定性, 求解策略为原方案与现方案变动最小, 重新安排的成本最小。动态任务重调度模型可以用如下五元组表示:

$$\Xi_{r+1} = \langle \Xi_r, \beta_{\Xi_r}, M_{dis}, S_{ter}, \Gamma \rangle$$

其中,  $\Xi_r$  表示在卫星失效前的原调度问题;  $\beta_{\Xi_r}$  是调度问题  $\Xi_r$  的解;  $S_{ter}$  表示发生故障的卫星;  $M_{dis}$  是由于卫星失效原因而解约的任务, 即在  $t$  时刻开始一段时间  $T$  内,  $S_{ter}$  无法完成已建立合同中的任务, 记在  $T$  时间内, 该星星上存储容量及可用电源均为 0, 即:

$$SSR_j(S_{ter}, t') \vee POW_j(S_{ter}, t') = 0;$$

$\Gamma$  扰动测度。度量当任务动态变化后原方案与所得到的新方案之间变化程度,

$$\begin{aligned} \Gamma &= \Gamma(\Xi_r, \Xi_{r+1}) \\ &= \sum_{\substack{i=N_T \\ m \in \bigcup_{i=1}^{N_T} \{s_i, e_i\}}} |\beta_{\Xi_{r+1}}(m) - \beta_{\Xi_r}(m)| / \beta_{\Xi_r}(m) \end{aligned}$$

## 3 可解约合同网任务规划求解

敏捷卫星任务规划求解需要考虑对象间的关系错综复杂。为解决关键问题, 作出合理性假设如下所述:

(1) 每个敏捷卫星只携带一个传感器。

(2) 每个敏捷卫星 Agent 星载传感器在任意时刻最多只能执行一个任务。

(3) 所有 Agent 均有诚实性,无私性。每个敏捷卫星在投标时不会做任何虚假和隐瞒自身完成任务的能力。

(4) 无需考虑博弈论的因素,在投标时不用考虑其他敏捷卫星 Agent 的投标策略,并且完成任务不会得到任何奖励。

(5) 在给定的任务执行时间段内,敏捷卫星相互间存在的星际链路通信可靠,时时可用。

### 3.1 招投标机制设计

根据 Multi-Agent 技术以及合同网特点,设计了一种基于诚信的招投标机制,将决策敏捷卫星 Agent 映射为招标方,成员敏捷卫星 Agent 映射为投标方;招投标是基于决策敏捷卫星 Agent 为主的结构,采用密封式报价以及公开招标的形式展开,招投标机制设计如图 1 所示。

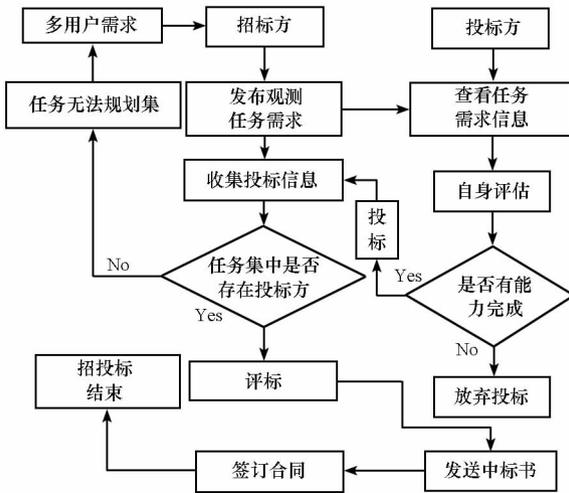


图 1 招投标机制设计流程图

Fig. 1 Flow chart of bidding mechanism design

(1) 决策敏捷卫星 Agent 代表招标方将招标的截止日期、用户需要完成的观测任务信息和相关目标要求等向潜在的招标方发布任务招标书。

(2) 成员敏捷卫星 Agent 代表投标方接收到招标信息后,依据观测任务进行自身能力评估,是否能完成招标任务,若能则依据招标要求向招标方进行竞标,填写投标书向招标方发送,否则放弃招标。

(3) 评标。招标方在投标截止日期后对收集到的由投标方发送来的投标书按照一定的评标策略进行评标,选择评估结果最好的投标作为中标单位执行任务。

(4) 由于卫星失效而引起的“解约任务”成为动态任务后,首先由成员敏捷卫星 Agent 向决

策敏捷卫星 Agent 提出解约,解约后,代表招标方的决策敏捷卫星 Agent 重新向可用的卫星资源进行任务招投标全过程,进行任务的重新调度,选择合适的投标方成员敏捷卫星 Agent 来执行动态观测任务。

### 3.2 基于诚信机制的可解约合同网协议

合同网是 Smith 提出的一种协商方法,解决多 Agent 任务协作分配问题,目前已经成功运用于制造调度、工程调度以及卫星上自主规划等多个领域<sup>[15-16]</sup>。在传统合同网协议的基础上设计了基于诚信机制的可解约合同网协议。诚信机制是每个敏捷卫星 Agent 必须遵守的基本准则。在任务招投标、投标以及任务规划执行过程中,决策敏捷卫星 Agent 和成员敏捷卫星 Agent 之间应客观诚信、公平公正如实发送真实信息,不能隐瞒自身的状况,每个卫星 Agent 都要遵守诚信机制,以利于任务分配工作的顺利进行,尽可能降低观测成本、计算资源消耗,提高任务完成效益。

敏捷卫星多任务规划合同网协议是由若干个节点构成,每一个敏捷卫星 Agent 映射为一个合同网节点 Agent。卫星失效时出现“解约”情况是不可避免的,所有的“解约任务”成为动态任务后需要由决策敏捷卫星重新向其他可用卫星资源进行招投标,以求建立观测合同,完成需求目标的观测。

### 3.3 招投标及评标策略

#### 3.3.1 招标策略

招标策略依据观测任务的优先级,由决策敏捷卫星将同一级别的任务进行成批次的招标,其能够减少卫星解约合同的数量,能够减少协商的次数,减少卫星通信,降低成本,尽快找出任务预定规划方案。

#### 3.3.2 投标策略

成员敏捷卫星 Agent 接收到招标方发送的招标书,根据观测任务信息并按照投标规则对自身完成任务的能力进行评估,决定投标与否。在作出投标决策之前主要是对自身实时资源进行评估,若不满足,则放弃投标。设计的投标规则流程如图 2 所示,一些约束评估计算如下:

##### (1) 可见时间窗约束

观测任务的可见时间窗需要满足,  $ST_j \leq DT_j \leq ET_j, 1 \leq j \leq N_r, DT_j$  代表观测任务  $t_j$  要求的持续观测时间。

##### (2) 侧摆角和俯仰角调整时间评估

执行任务时敏捷卫星侧摆角及俯仰角的调整

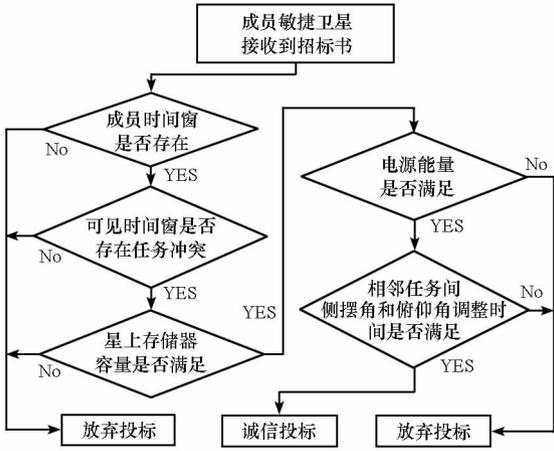


图 2 成员敏捷卫星 Agent 投标策略图

Fig. 2 Bidding strategy map of member AS Agent

时间需在两个任务之间完成,即任意两个观测任务之间需要满足:

$$a_f |st_{j+1} - et_j| \geq |EL_{e_{j+1}} - EL_{e_j}|, 1 \leq j \leq N_T$$

$$a_b |st_{j+1} - et_j| \geq |AZ_{i_{j+1}} - AZ_{i_j}|, 1 \leq j \leq N_T$$

$EL_{e_i}$  代表在敏捷卫星  $AgentS_i$  在执行  $t_j$  时的俯仰角;  $a_f$  代表卫星  $j$  进行姿态调整俯仰角的角速度;  $AZ_{i_j}$  代表在敏捷卫星  $AgentS_i$  在执行  $t_j$  时的滚动角;  $a_b$  代表卫星  $j$  进行姿态调整滚动角的角速度;  $st_j$  代表  $t_j$  的实际开始时间;  $et_j$  代表  $t_j$  的实际结束时间。

### (3) 存储容量评估

敏捷卫星在执行  $t_j$  时需要满足存储容量约束,即:

$$cssr_j \leq SSR_{aval}^{prej} \leq SSR_{max}^{agents_i}, 1 \leq j \leq N_T$$

$cssr_j$  代表敏捷卫星  $AgentS_i$  完成  $t_j$  消耗的存储器容量;  $SSR_{aval}^{prej}$  代表敏捷卫星在执行之前星上所剩余的存储容量;  $SSR_{max}^{agents_i}$  代表卫星  $AgentS_i$  星上最大存储容量。

### (4) 电源能量评估

敏捷卫星在执行  $t_j$  时需要满足电源能量约束,即:

$$|EL_{e_{j+1}} - EL_{e_j}| ap_{Et_j}^{agents_i} / a_f + |EL_{e_{j+1}} - EL_{e_j}| ap_{At_j}^{agents_i} / a_b \leq POW_j^s, 1 \leq i \leq N_s, 1 \leq j \leq N_T$$

$ap_{Et_j}^{agents_i}, ap_{At_j}^{agents_i}$  代表敏捷卫星侧摆及俯仰姿态调整时,单位时间内所消耗的电源数。

### 3.3.3 评标策略

当决策敏捷卫星接收到由成员敏捷卫星发送来的投标书后,需要对投标方进行评标。评标策略主要由以下几种:

#### (1) 最早完成时间优先策略

针对同一批次的观测任务,招标方针对任务完成时间需求的紧急程度,可以采用最早完成时

间优先策略,即从所有投标任务中选择能够最早完成观测任务的招标方为中标方。设同一优先级的任务招标数为  $n$ , 没有可用时间窗的观测任务结束时间为 0, 即  $et_j = 0$  时不参与时间窗的比较;  $et_j$  代表成员敏捷卫星  $AgentS_i$  完成观测任务  $t_j$  的实际结束时间。则:

$$eb_i = \min_{j=1}^{j=n} \{et_{ij}\}, 1 \leq i \leq N_s$$

#### (2) 任务成本最小策略

敏捷卫星执行任务时需要调整俯仰和侧摆的姿态,成像时需要将所拍照存入星上存储器中,其均需要消耗掉电源能量,视为卫星执行任务的成本,由成员敏捷卫星评估出每完成一个  $t_j$  所需要的成本,令  $c_{ij}$  代表成员敏捷卫星  $AgentS_i$  完成观测任务  $t_j$  所花费的成本,则:

$$eb_c = \min_{j=1}^{j=n} \{c_{ij}\}, 1 \leq i \leq N_s$$

#### (3) 负载均衡策略

在多敏捷卫星任务规划过程中,需要充分考虑到卫星负载任务均衡问题,在同等条件下可以优先选择哪些合同任务总数最少的卫星作为中标方。令  $Mc_{ij}$  代表成员敏捷卫星  $AgentS_i$  在投标观测任务  $t_j$  前已经签订的合同数,则:

$$eb_f = \min_{j=1}^{j=n} \{Mc_{ij}\}, 1 \leq i \leq N_s$$

本文将采取综合评标策略:

$$EBr = \alpha_t eb_t + \alpha_c eb_c + \alpha_f eb_f$$

$\alpha_t, \alpha_c, \alpha_f$  分别为三个评标策略的权重。以上评标策略的选择可以依据任务类型需求的不同而选择不同权重的策略,也可以根据用户需求来作出决策。

### 3.4 求解算法

传统合同网每次招标一个任务,而且规定了后续的任务不能占用先前任务的资源,因此不利于任务规划的合理优化。当有任务优先级更高的任务需要调度,且其所需要卫星资源被原来任务优先级低的任务所占用时,需要对原来签订的合同进行解约,解约任务成为动态任务后需要重新进行规划,由决策敏捷卫星向其他可用的成员敏捷卫星重新进行招投标,可能需要占用任务优先级低或成本消耗大的卫星资源与原任务进行解约,需要重新建立新的合同。基于上述思想和本文设计的招投标机制,提出了基于可解约合同网协议的敏捷卫星动态任务分配算法(Agile satellite dynamic task allocation algorithm based on agreement ending contract net) (ASDAAC)。

敏捷卫星任务规划调度问题本身具有复杂

性,是多约束多组合的优化问题,其求解难度与问题的规模、任务的空间分布、求解策略、求解精度等密切相关。ASDAAC 算法复杂性分析从最坏的情况下展开,假设共有  $m$  个卫星发生故障,在故障时间内平均有  $n$  个任务需要重新进行调度,则需要重新规划的任务数量共有  $mn$  个,将这些动态任务分批次地并行进行招标,循环次数远小于  $mn!$ ,小于传统的算法循环次数;因此采用本算法搜索空间减小、类似于并行求解技术、算法求解效率会提高。

```

算法名称:ASDAAC
Input:观测任务集  $T^M = \{t_1, t_2, \dots, t_{N_T}\}$ 
Output:观测任务集的任务规划方案  $T^{MP}$ 

Begin
(1) 决策敏捷卫星 Agent( $AS^{DAgent}$ ) 接收到任务集
(2) while  $T^M \neq \phi$ 
(3)  $AS^{DA}$  按照优先级顺序,分批次地进行招标
(4) for each 成员敏捷卫星 Agent( $AS^{MAgent}$ )
(5)  $AS_i^{MAgent}$  对观测任务  $t_j$  约束计算,评估自身能力
(6) if  $AS_i^{MAgent}$  有能力完成任务 then 发送投标书给  $AS^{DAgent}$ 
    else 不投标; end if
    end for
(7)  $AS^{DA}$  收到  $AS^{MAgent}$  发来的投标书,按照一定的策略评标,选出最好的评标结果,向投标方发送中标书
(8)  $AS^{MAgent}$  接收到中标书后对任务再次约束检测
    if 没有冲突确保有能力完成后发送确认合同确认信息,建立合同;else 去除任务,发送解约任务信息给  $AS^{DA}$  end if
(9) for each 成员敏捷卫星 Agent( $AS^{MAgent}$ )
    if  $t$  时刻,  $AS_i^{MAgent}$  失效,则发送请求解除合同给  $AS^{DA}$ , then  $AS_i^{MAgent}$ 
         $SSR_j(S_{ter}, t') \vee POW_j(S_{ter}, t') = 0$ ; end if
    if 发生解约操作, then  $AS^{DA}$  将由解除合同引起的解约任务集  $T^{AEC}$  添加到  $T^M$  and  $AS^{DA}$  将失效卫星  $S_i$  在可用卫星资源集中去除; end if
(10) for  $T^{AEC}$  重新进行招投标, Go to (2)
    end for
end
    
```

### 4 仿真算例

本文所采用的轨道数据来源于 AGI 公司于 2010 年 6 月发布的全球卫星轨道数据库,选择在实际应用中最广泛的观测需求点目标为例展开研究。首先以 3 颗敏捷卫星 10 个观测任务为例阐述整个动态任务规划调度过程。敏捷卫星  $S = \{IKONOS\_2, OrbView\_3, SPOT5\}$  为可用资源集合。任务需求观测任务需要考虑成像类型、地面分

辨率、观测可持续时间,其坐标位置是通过随机产生的;设置以 10 个点目标,规划时段为 24 小时研究敏捷卫星动态任务规划问题。本研究仿真算例是使用 java 语言开发,基于 FIPA 规范的 JADE 平台以及通用卫星软件 STK 共同实现,调度原始方案如表 1 所示。

表 1 敏捷卫星任务调度的原始方案

Tab.1 Primary program of agile satellite task scheduling

任务 标号	经纬度 / (°)	卫星 名称	开始时间 (1 Jul 2007)	结束时间 (1 Jul 2007)
TB10	(-9, -42)	IKONOS2	12:00:00.0001	12:05:36.284
TB8	(-41, -32)	IKONOS2	12:05:48.452	12:12:42.951
TB9	(-16,65)	ORBVIEW3	18:44:42.597	18:49:26.439
TB6	(20, -50)	SPOT5	12:50:40.971	12:58:21.312
TB5	(-28, -106)	IKONOS2	15:25:38.156	15:28:52.118
TB7	(-22,100)	ORBVIEW3	15:35:28.885	15:40:58.004
TB3	(43, -104)	SPOT5	16:07:34.840	16:14:37.200
TB1	(-60, -101)	IKONOS2	12:19:29.992	12:24:18.253
TB4	(-36,81)	ORBVIEW3	17:05:24.287	17:11:06.937
TB2	(-57, -7)	ORBVIEW3	23:14:34.641	23:20:06.445

表 2 调整后的任务规划方案

Tab.2 Adjusted task planning program

任务 标号	卫星 名称	开始时间 (1 Jul 2007)	结束时间 (1 Jul 2007)
TB10	IKONOS2	12:00:00.0001	12:05:36.284
TB8	IKONOS2	12:05:48.452	12:12:42.951
TB9*	SPOT5	18:45:04.947	18:53:15.158
TB6	SPOT5	12:50:40.971	12:58:21.312
TB5	IKONOS2	15:25:38.156	15:28:52.118
TB7*	IKONOS2	15:54:30.374	16:00:58.089
TB3	SPOT5	16:07:34.840	16:14:37.200
TB1	IKONOS2	12:19:29.992	12:24:18.253
TB4*	IKONOS2	17:28:52.903	17:35:58.801
TB2	ORBVIEW3	23:14:34.641	23:20:06.445

设敏捷卫星 ORBVIEW3 在 1 Jul 2007 15:00:00 时刻发生故障,故障时间为 6h,即在 1 Jul 2007 21:00:00 卫星故障排除,则此段时间内 ORBVIEW3 已经规划好的任务需要重新调度,按照动态调度模型,以原调度方案的任务扰动最小为目标,基于诚信机制的可解决合同网需对解约任务重新进行招投标。调整后的任务规划方案如表 2 所示。可以看出,由于卫星 ORBVIEW3 而引起三个解约任务,在本案例中正好其他卫星对这三个任务存在剩余观测时间窗,并未引起其他任务的解约情况,  $I = 30%$ , 动态任务规划方案扰动很理想。

卫星数量为 3 颗时,当 ORBVIEW3 卫星故障 6h,产生的任务解约数量与总任务规划数量之间

的关系如图 3 所示。从图中可以看出,随着任务规划数量增加,解约后成为动态任务的数量也相应增加。本文继续研究了可用敏捷卫星资源数目增加为 5 颗、7 颗和 9 颗,总规划任务数量分别为 50、150、300、500 时,卫星失效时间仍为 6h 情况下敏捷卫星动态任务规划问题。当敏捷卫星资源数量发生变化,同时任务数量也发生变化时,一颗卫星失效后,所产生的解约任务数量与卫星数目、规划任务数之间的关系如图 4 所示。

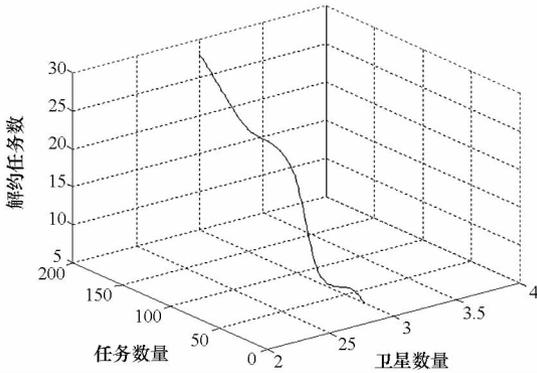


图 3 卫星数量为 3 颗时总规划任务数与解约任务数之间的关系图

Fig. 3 Relationship diagram between the total number of planning tasks and discharge tasks as three satellites

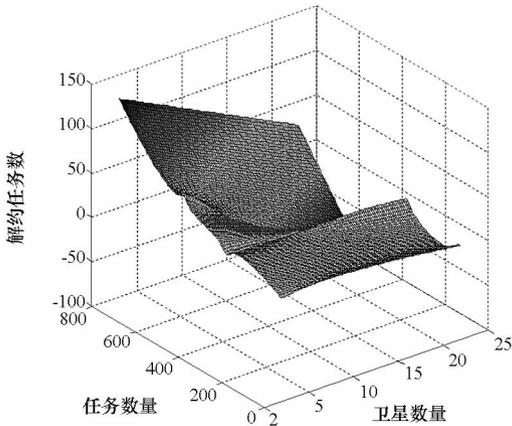


图 4 卫星数目、规划任务数及解约任务数之间的关系图

Fig. 4 Relation diagram of number of satellites, planning tasks and discharge tasks

从图 4 中可以看出,当规划任务数量一定时,随着卫星数量的增加,在相同的卫星故障时间内可解约任务数量和任务扰动率均变小;而当敏捷卫星数量一定时,随着总规划任务数量的增加,在相同的故障时间内,可解约任务数量也相应增加,但任务扰动率相差不大,围绕 10% 上下波动。当卫星数量和任务数量均增加时,可解约任务数量会有相应增加,但任务扰动率会减小,其主要是因为解约后的动态任务数量增加比例小于总

规划任务数量增加的比例。由此可见,本文提出的方法能够很好地解决敏捷卫星动态任务规划问题,使得调度后的方案与原调度方案具有一致性和执行稳定性。

### 5 结论

本文提出动态任务规划方法与传统集中式解决卫星动态任务规划方法相比主要有以下几点不同:

- (1) 相对于传统的任务规划方法,本文的运算类似于并行计算求解算法,求解运行时间短,解决问题高效。
- (2) 传统的集中式动态任务调度方法对于多目标决策和问题编码均较难解决,而本文提出方法能够有效解决这一问题。
- (3) 传统的集中式动态任务调度方法依据任务类型的不同,需要采用不同的解决方式和问题编码,而本文能够解决问题适应性很好,扩展性很强,只需设置不同的权重即可区分任务的种类,采用不同的决策方法。

在深入分析敏捷卫星特点及多用户任务需求基础上,本文构建了基于 Multi-Agent 敏捷卫星多任务分配模型及动态任务重调度模型,解决了卫星失效情况下不能按照原始预定方案执行,任务解约及重调度问题;针对敏捷卫星任务规划特点,提出了基于诚信机制的可解约合同网任务分配方法,详细设计了招投标机制、可解约合同网协议以及招投标、评标策略,在此基础上研究了基于可解约合同网协议的敏捷卫星动态任务分配算法,其能够解决敏捷卫星动态任务规划以及算法求解问题。以敏捷卫星动态任务规划调度问题为例,通过实验获得了满意的结果,表明了模型的合理性以及算法的有效性。

在下一步的研究中拟从另一个角度展开研究,考虑加入信念、期望和意图三种心智状态的 Agent 模型研究多星多任务规划调度问题,研究构建 BDI 模型下的基于 Agent 技术敏捷卫星任务规划调度及重调度问题。

### 参考文献 (References)

[1] Chen Y, Zhang D Y, Zhou M Q, et al. Multi-satellite observation scheduling algorithm based on hybrid genetic particle swarm optimization [J]. Advances in Information Technology and Industry Applications, 2012: 441 - 448.

[2] Marinelli F, Nocella S, Rossi F, et al. A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38: 1572 - 1583.

[3] 陈宇宁, 邢立宁, 陈英武. 基于蚁群算法的灵巧卫星调度

- [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(3): 484 - 489.
- CHEN Yuning, XING Lining, CHEN Yingwu. Scheduling of agile satellites based on ant colony algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(3): 484 - 489. (in Chinese)
- [4] Globus A, Crawford J, Lohn J, et al. Scheduling earth observing fleets using evolutionary algorithms: Problem description and approach [C]//Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2002.
- [5] Bai Baocun, XU Yifan, HE Renjie, et al. Maximum coverage model and algorithm for satellite scheduling observation with task merging [J]. Journal of System Engineering, 2010, 25(005): 651 - 658.
- [6] Lematre M, Verfaillie G, Jouhaud F. How to manage the new generation of agile earth observation satellites [C]//Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2000.
- [7] Lematre M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites [J]. Aerospace Science and Technology, 2002, 6(5): 367 - 381.
- [8] Habet D, Vasquez M. Saturated and consistent neighborhood for selecting and scheduling photographs of agile earth observing satellite [C]//The Fifth Metaheuristics International Conference, 2003.
- [9] Li Y Q, Xu M Q, Wang R X. Scheduling observations of agile satellites with combined genetic algorithm [C]//The Third International Conference on Natural Computation, 2007; 29 - 33.
- [10] 李玉庆, 徐敏强, 王日新. 三轴稳定卫星点目标观测任务优化调度技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(6): 1447 - 1451.
- LI Yuqing, Xu Minqiang, Wang Rixin. Scheduling observation of spot object of three-axis stabilized satellites[J]. Journal of Jilin university (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(6): 1447 - 1451. (in Chinese)
- [11] 向仍湘. 敏捷卫星任务调度技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010.
- XIANG Rengxiang. Research on selecting and scheduling observation of agile satellites [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [12] Schetter T, Campbell M, Surka D. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations [J]. Artificial Intelligence, 2003, 145(1): 147 - 180.
- [13] 王冲, 景宁, 李军, 等. 一种基于多 Agent 强化学习的多星协同任务规划算法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(001): 53 - 58.
- WANG Chong, JING Ning, LI Jun, et al. An algorithm of cooperative multiple satellites mission planning based on multi-agent reinforcement learning [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, (33): 53 - 58. (in Chinese)
- [14] 高黎. 对地观测分布式卫星系统任务协作问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2007.
- GAO Li. Research on earth observation task cooperation for distributed satellites system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] 张正强. 基于 MAS 的分布式成像卫星系统任务规划与控制问题研究[D]. 长沙:国防科技大学 2006.
- ZHANG Zhengqiang. Research on mission planning and control problem for distributed imaging satellite system based on MAS [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [16] 周军升. 基于多 Agent 的多星任务分配问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009.
- ZHOU Junsheng. Research on task allocation for multiple satellites based on multiple agents [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)