

# 基于双层优先级的中继卫星系统任务调度算法<sup>\*</sup>

郭超<sup>a</sup>, 熊伟<sup>b</sup>, 郝利云<sup>a</sup>

(装备学院 a. 研究生管理大队; b. 复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

**摘要:** 中继卫星系统在天基信息网中起着桥梁的作用。为充分利用卫星资源以提供快速可靠的数据中继服务, 需要对高价值、高紧迫性的任务开展调度方法研究。在分析中继卫星系统任务与资源的基础上, 建立了多任务、多资源的调度模型; 提出了任务调度优先级和时间窗口选择优先级模型, 并在此基础上提出了一种基于双层优先级的中继卫星系统调度算法。根据算法在仿真算例中的应用可见, 相比对照算法, 基于双层优先级的调度算法更有利于满足高价值、高紧迫性任务的执行条件, 从而提高了任务成功率和调度综合收益。

**关键词:** 跟踪与数据中继卫星系统; 任务调度; 时间窗口选择; 优先级模型

**中图分类号:** TN927+.23      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1506-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.049

## Relay satellite system task scheduling algorithm based on double-layer priority

Guo Chao<sup>a</sup>, Xiong Wei<sup>b</sup>, Hao Liyun<sup>a</sup>

(a. Dept. of Graduate Management, b. Simulation Laboratory of Science & Technology on Complex Electronic System, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Tracking and data relay satellite system is the bridge in space-based information network. For making full use of satellite resources to provide reliable and rapid services of data relay, it is necessary to research the scheduling methods of tasks with high value and great urgency. This paper firstly built a scheduling model of multiple tasks and resources based on analyses of tasks and resources of relay-satellite system. Then, it put forward priority models of task scheduling and time window selection, and on the basis, it proposed a relay satellite system task scheduling algorithm based on double-layer priority. Finally, according to the application of the algorithm in a simulation example, it can be seen that by comparison with the compared algorithms, the proposed algorithm based on double-layer priority is more efficient to satisfy the conditions of tasks with high value and great urgency, so improves the total revenue of scheduling and success rate of tasks.

**Key words:** tracking and data relay satellite system; task scheduling; time window selection; priority model

## 0 引言

跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)作为天基信息网的骨干节点,能够为中、低轨道卫星提供星间或星地数据中继服务,是提高信息获取、传输时效性,保证跟踪连续性的有效手段<sup>[1-4]</sup>。随着天基信息网的建设,中继卫星面临用户数量不断增多、任务数据量急剧增长的局面,如何利用有限卫星资源提供更有效的数据中继服务,是中继卫星系统资源管控亟待解决的重要问题。

中继卫星系统任务调度就是由地面管控机构为数据中继任务合理地分配卫星资源及执行时间,以尽可能地满足用户需求,提高任务成功率和执行收益<sup>[5-7]</sup>。文献[5,6]针对美国TDRSS,提出了基于时间窗口并行机(PM-TW)调度理论的算法;在此基础上,文献[7]考虑到多个中继卫星传输速率和状态切换时间不同的问题,提出了异构的时间窗口并行机调度(NPM-TW)模型。文献[8]通过分析中继卫星系统资源、任务和约束,建立了一种基于时间灵活度的调度算法。文献[9]建立了微波/光混合链路数据中继卫星资源调度模型,提出了基于时间窗口更新的调度算法。文献[10]综合考虑可见时间窗口、用户任务属性、前向资源受限等约束条件,建立了中继卫星

任务调度约束规划模型,提出基于人工蜂群算法求解调度问题。这些研究主要面向常规条件下的任务调度。然而,为战场侦察和战略预警等任务提供数据中继服务已成为当前中继卫星的重要职能,此类任务的数据不仅有较高的价值,还具有很强的时效性,需要快速、可靠的中继服务。因而中继卫星系统的任务将具有明显的紧迫性,而目前面向常规条件下的任务调度研究在模型和算法中对任务紧迫性考虑较少,因此在高价值、高紧迫性任务中难以获得更优的调度方案。

本文建立了面向多资源、多任务的中继卫星系统任务调度模型,提出了一种基于双层优先级的调度算法。其中,任务调度优先级综合了任务重要度、紧迫度和需求满足难度等因素,而时间窗口选择优先级考虑了窗口的利用度和服务及时度。在调度过程中,算法以双层优先级作为调度的启发信息,经仿真算例验证,该算法有利于满足高价值、高紧迫性任务的执行条件,在具有紧迫性要求的应用中,能够有效提高任务成功率和调度综合收益。

## 1 中继卫星系统任务调度建模

首先对问题作如下假设:a)地面数据接收资源充足,不必考虑数据下行链路规划;b)各用户航天器的任务相互独立且

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-06      基金项目: 国家“863”计划资助项目

作者简介: 郭超(1987-),男,山东济南人,博士研究生,主要研究方向为天基信息系统优化(gch\_87\_10\_26@126.com);熊伟(1971-),男,研究员,博士,主要研究方向为网络信息体系;郝利云(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为空间信息获取与处理。

不具有可分性,既不允许任务之间抢占资源,也不允许将一个任务分割为多个时段执行;c)各卫星均搭载单址天线,同一时刻最多只能服务于单个任务;d)一个数据中继任务最多只能分配给一个天线资源执行。

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_H\}$  为用户航天器集合,  $H \geq 1$  为用户总数;  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$  为中继卫星系统可用资源集合,  $M \geq 1$  为卫星总数。假设各用户至少提交一项数据中继任务需求,则待处理的任務集合为  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ ,  $N \geq H$  为任务总数,  $C$  为全部任务的调度周期。

### 1.1 数据中继任务

数据中继任务  $t_i \in T (1 \leq i \leq N)$  可用六元组表示为  $t_i = \langle I_i, D_i, b_i, e_i, B_i, E_i \rangle$ 。其中,  $I_i \in (0, 1)$  为任务的重要度,反映了任务价值大小,通常由管控机构依据服务对象重要程度设定;  $D_i$  为  $t_i$  待传输数据量;  $b_i$  为  $t_i$  开始时间;  $e_i$  为  $t_i$  完成时间;  $B_i$  为  $t_i$  最早允许开始时间,是用户对  $t_i$  开始执行时间的限定;  $E_i$  为  $t_i$  最晚允许完成时间,即截止期,是用户对  $t_i$  完成期限的要求,则  $t_i$  被限定在  $B_i \sim E_i$  期间完成数据量  $D_i$  的传输,如图1所示。在此将时段  $B_i \sim E_i$  称为  $t_i$  的需求限定区间,记为  $W_i^t$ ,其长度反映了任务需求的苛刻程度。

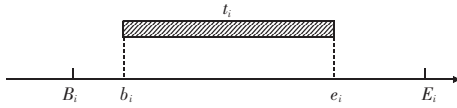


图1 任务需求限定区间

### 1.2 中继卫星资源

数据中继任务的执行依赖于卫星搭载的天线资源,在此认为一个中继卫星仅搭载一个天线(多天线卫星可以转换为多个单天线卫星的情况),则中继卫星资源  $r_j \in R (1 \leq j \leq M)$  可以简单表示为三元组  $r_j = \langle v_j, s_j, W_{i,j} \rangle$ 。其中,  $r_j$  通过天线波束同用户航天器建立星间链路,  $v_j$  为链路数据传输速率。任意天线资源由空闲状态转入任务执行或先后执行两个任务时,需要一定的切换时间以进行星间链路建立、配置或中断、释放<sup>[10]</sup>,为此管控机构可根据天线性能预设一定的最小间隔,以确保天线状态切换完毕,以  $s_j$  表示该预设间隔。  $W_{i,j}$  为  $r_j$  对任务  $t_i$  的可用时间窗口,即  $r_j$  在  $W_{i,j}$  期间空闲且与  $t_i$  的用户航天器可见。  $W_{i,j} = \{w_{i,j,1}, w_{i,j,2}, \dots, w_{i,j,p_{i,j}}\}$ ,  $w_{i,j,k} (1 \leq k \leq p_{i,j})$  表示第  $k$  个子窗口,其开始与结束时间分别记为  $b_{i,j,k}^w$  和  $e_{i,j,k}^w$ ,  $p_{i,j}$  为子窗口总数。  $t_i$  必须在某可用时间窗口  $w_{i,j,k}$  内执行,如图2所示。综合需求限定区间与可用时间窗口的影响,  $t_i$  必须在  $W_i^t$  与某可用时间窗口  $w_{i,j,k}$  的重叠区间内执行。

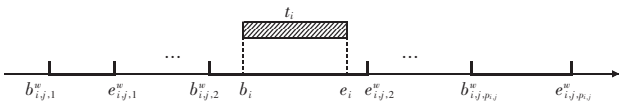


图2 资源可用时间窗口

### 1.3 任务调度模型

定义任务分配矩阵  $X = (x_{ij})_{M \times N}$ ,  $x_{ij}$  为其第  $i$  行第  $j$  列元素,若任务  $t_i$  被分配给卫星  $r_j$  执行,则  $x_{ij} = 1$ ,否则  $x_{ij} = 0$ 。中继卫星系统任务调度模型为

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} I_i \quad (1)$$

$$\max f_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \quad (2)$$

$$x_{ij} = 1, x_{i'j} = 1, i' \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq i' \Rightarrow$$

$$\min \{e_i, e_{i'}\} - \max \{b_i, b_{i'}\} \leq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1 \quad (4)$$

$$B_i \leq b_i, e_i \leq E_i \quad (5)$$

$$x_{ij} = 1 \Rightarrow b_{i,j,k}^w \leq b_i, e_i \leq e_{i,j,k}^w, k \in \{1, 2, \dots, p_{i,j}\} \quad (6)$$

$$x_{ij} = 1 \Rightarrow e_i - b_i \geq \frac{D_i}{v_j} \quad (7)$$

$$x_{ij} = 1, x_{i'j} = 1, i' \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq i' \Rightarrow$$

$$\max \{b_i, b_{i'}\} - \min \{e_i, e_{i'}\} \geq s_j \quad (8)$$

式(1)(2)为调度目标,其中,式(1)为目标1,表示任务调度综合收益最高<sup>[11]</sup>,式(2)为目标2,表示任务调度成功率最高。式(3)~(8)为约束,含义为:式(3)表示一个中继卫星同一时刻最多只能服务于一个任务;式(4)表示一个任务最多只能由一个中继卫星执行;式(5)表示任务必须在需求限定区间(最早允许开始时间至截止期)内执行;式(6)表示任务必须在中继卫星的可用时间窗口内执行;式(7)表示任务在执行时间内必须完成全部数据传输;式(8)表示同一卫星先后执行两个任务的间隔必须大于其天线状态切换时间。

## 2 中继卫星系统任务调度算法

在存在多中继卫星的情况下,每个任务可能有多个可用资源,而各资源又可能有多个可用时间窗口,为每个任务分配可用资源、确定执行时间,实际上就是对资源可用时间窗口(以下简称时间窗口)的分配。本文采用一种基于任务与时间窗口双层优先级的调度算法,基本思路为:首先基于任务优先级确定任务调度顺序,而后在各任务调度过程中,依据时间窗口优先级选择资源可用时间窗口。

### 2.1 任务优先级

任务优先级的确定基于三点考虑,即应优先调度重要度更高、更紧迫、需求更苛刻的任务。

#### 2.1.1 紧迫度

当数据时效性要求较高时,调度需考虑任务的紧迫程度。任务紧迫程度的直观反映是其截止期。截止期是任务完成的最晚期限,同时也规定了任务调度的边界,若任务  $t_i$  比其他任务具有更早的截止期,则其应得到优先调度,否则失败的概率更大。在当前任务集合中,任务  $t_i$  紧迫度定义为

$$U_i = \frac{n_i}{N} \quad (9)$$

#### 2.1.2 需求满足难度

任务必须在需求限定区间与资源可用窗口的重叠区间内执行。若任务  $t_i$  的需求限定窗口为  $W_i^t$ ,且  $M$  个中继卫星对  $t_i$  的可用时间窗口分别为  $W_{i,1}, W_{i,2}, \dots, W_{i,M}$ ,则  $W_i^t$  与某子窗口  $w_{i,j,k}$  存在重叠的判断依据为

$$\max \{B_i, b_{i,j,k}^w\} < \min \{E_i, e_{i,j,k}^w\} \quad (10)$$

首先,定义子窗口  $w_{i,j,k}$  对  $t_i$  的需求满足度为

$$F_{i,j,k}^w = \begin{cases} \frac{\min \{B_i, b_{i,j,k}^w\} - \max \{E_i, e_{i,j,k}^w\}}{E_i - B_i} & \text{if 式(10)成立} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$F_{i,j,k}^w$  的含义为  $W_i^t$  与  $w_{i,j,k}$  重叠时长占  $W_i^t$  长度的百分比,反映了某子窗口对任务需求的需求满足程度,当需求限定区间完全包含于某子窗口范围内时,该子窗口对任务的满足度为1。综合各子窗口对  $t_i$  的满足度,可得资源  $r_i$  对  $t_i$  的需求满足度为

$$F_{i,j}^r = \sum_{k=1}^{P_{i,j}} F_{i,j,k}^w \quad (12)$$

综合各资源对  $t_i$  的需求满足度,则  $t_i$  的需求满足难度定义为

$$F_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (1 - F_{i,j}^r) \quad (13)$$

需求满足难度反映了在当前资源条件下任务需求的苛刻程度,进而体现其调度困难程度。若需求满足难度较高,说明在当前资源条件下,任务需求更难以满足,调度难度更大。此时若任务未得到优先调度,其可用时间窗口可能被其他任务占用,导致无法执行,因此应优先调度需求满足难度高的任务。

### 2.1.3 任务调度优先级

综合任务重要度、紧迫度与需求满足难度,任务调度优先级定义为

$$P_i = \omega_I \times I_i + \omega_U \times U_i + \omega_F \times F_i \quad (14)$$

其中: $\omega_I$ 、 $\omega_U$ 、 $\omega_F$  为权重系数,满足  $\omega_I + \omega_U + \omega_F = 1$ ,  $\omega_I > \omega_U > \omega_F$ ,表示调度中首先考虑重要度,其次考虑紧迫度,最后考虑需求满足难度。

## 2.2 时间窗口优先级

由于不具可分性,任务须在一个连续时间区间内完成数据传输。对于任务  $t_i$  和资源  $r_i$ ,在式(10)条件成立的前提下,若重叠区间长度足以支持  $r_i$  状态切换与  $t_i$  数据传输,即式(15)条件成立。

$$\min\{E_i, e_{i,j,k}^w\} - \max\{B_i, b_{i,j,k}^w\} \geq D_i/v_j + s_j \quad (15)$$

则  $t_i$  在时间窗口  $w_{i,j,k}$  内可执行。对于当前调度任务,通常存在多个时间窗口均可令其可执行,时间窗口的选择基于两点考虑:优先选择利用率更高的时间窗口;优先选择服务更为及时的时间窗口。

### 2.2.1 时间窗口利用率

对于任务  $t_i$  与资源  $r_i$ ,若式(15)成立,即  $t_i$  在时间窗口  $w_{i,j,k}$  内可执行,定义  $w_{i,j,k}$  的利用度为

$$L_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{D_i/v_j}{\min\{E_i, e_{i,j,k}^w\} - \max\{B_i, b_{i,j,k}^w\} - s_j} & \text{if 式(15)成立} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$L_{i,j,k}$  含义为  $t_i$  数据传输时间占扣除资源状态切换时间后的可执行区间长度的百分比,  $L_{i,j,k}$  较大时,表明数据传输时间与可执行区间长度接近,该区间空闲时间较少,利用率较高。在任务调度中,优先选择利用度高的时间窗口,能够减少资源的空闲时间,有利于资源腾出更大的时间窗口应对后续数据量更大的任务。

### 2.2.2 时间窗口服务及时度

对于任务  $t_i$  和资源  $r_i$ ,若式(15)条件成立,则  $t_i$  在时间窗口  $w_{i,j,k}$  内可执行,此时  $t_i$  最早开始时间为  $b_i = \max\{B_i, b_{i,j,k}^w\} - s_j$ ,最早完成时间为  $e_i = b_i + D_i/v_j$ 。定义  $w_{i,j,k}$  服务及时度为

$$J_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{E_i - \max\{B_i, b_{i,j,k}^w\} - s_j - D_i/v_j}{E_i - B_i} & \text{if 式(15)成立} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$J_{i,j,k}$  的含义为当  $t_i$  在  $w_{i,j,k}$  内执行时,其完成时间相对截止期的最大提前量占任务需求限定区间长度的百分比。时间窗口服务及时性反映了资源对任务提供及时有效服务的能力。在调度中,优先选择服务及时性高的时间窗口,可以减少任务在执行前的等待时间,有利于保留资源用于后续调度难度更大的任务。

### 2.2.3 任务调度优先级

综合时间窗口的利用度和服务及时性,窗口选择优先级定义为

$$G_{i,j,k} = \theta_L \times L_{i,j,k} + \theta_J \times J_{i,j,k} \quad (18)$$

其中: $\theta_L$ 、 $\theta_J$  为权重系数,满足  $\theta_L + \theta_J = 1$ 。

## 2.3 调度算法描述

基于双层优先级(double layer priority, DLP)的中继卫星系统任务调度算法(简记为 DLP 算法)的基本步骤如算法 1 所示。

算法 1 基于双层优先级的中继卫星系统任务调度算法  
 输入:  $T, R$ 。/\* 输入为数据中继任务集与中继卫星资源集 \*/  
 输出:  $X, T_{\text{succ}}, T_{\text{fail}}$ 。/\* 输出为任务分配矩阵、成功任务集合、失败任务集合 \*/  
 1  $X = 0, T_{\text{succ}} = \emptyset, T_{\text{fail}} = \emptyset$ ;  
 2 for every  $t_i (t_i \in T)$   
 3 calculate  $U_i$  and  $F_i$  with 式(9)(13); /\* 计算任务紧迫度与需求满足难度 \*/  
 4 calculate  $P_i$  with 式(14); /\* 计算任务调度优先级 \*/  
 5 end for  
 6  $Q = \text{order}(\{t_1, t_2, \dots, t_N\}, P, \text{descending})$ ; /\* 对全部任务按照调度优先级递减排序,生成任务调度队列  $Q$  \*/  
 7 while( $Q \neq \emptyset$ )  
 8 take  $q_1$ , the first of  $Q$ ; /\* 取  $Q$  中优先级最高的任务 \*/  
 9 for( $j = 1; j \leq M; j++$ )  
 10 take  $r_j$  from  $R$ ; /\* 依次取  $R$  中的资源 \*/  
 11 for every  $w_{i,j,k} (w_{i,j,k} \in W_{i,j})$  /\* 遍历当前资源的可用时间窗口 \*/  
 12 if(式(15) is true) /\* 判断当前任务在当前时间窗口的可执行性 \*/  
 13  $q_1$  is executable in  $w_{i,j,k}$ ; /\* 当前任务在当前时间窗口可执行 \*/  
 14 calculate  $L_{i,j,k}$  and  $J_{i,j,k}$  with 式(16)(17); /\* 计算当前时间窗口的利用度和服务及时度 \*/  
 15 calculate  $G_{i,j,k}$  with 式(18); /\* 计算当前时间窗口的选择优先级 \*/  
 16 else  
 17  $q_1$  is non-executable in  $w_{i,j,k}$ ; /\* 当前任务在当前时间窗口不可执行 \*/  
 18  $G_{i,j,k} = 0$ ; /\* 当前时间窗口优先级为 0 \*/  
 19 end if  
 20 end for  
 21 end for  
 22  $[G_{\text{max}}, j_{\text{max}}, k_{\text{max}}] = \max\{G_{i,1,1}, \dots, G_{i,j,k}, \dots, G_{i,M,P_i,M}\}$ ; /\* 取当前优先级最高的时间窗口及所属的资源 \*/  
 23 if( $G_{\text{max}} \leq 0$ ) /\* 若对当前任务,各时间窗口优先级均为 0 \*/  
 24  $q_1$  is failed; /\* 当前任务调度失败 \*/  
 25 delete  $q_1$  from  $Q$ , add  $q_1$  to  $T_{\text{fail}}$ ; /\* 将当前任务从调度队列删除并加入失败任务集 \*/  
 26 else  
 27  $q_1$  is successful, and  $x_{j_{\text{max}}} = 1$ ; /\* 当前任务调度成功 \*/  
 28  $q_1 \cdot b = \max\{q_1 \cdot B, b_{i,j_{\text{max}},k_{\text{max}}}^w\} - s_{j_{\text{max}}}$ ; /\* 当前任务开始时间定为在优先级最高的时间窗口内的最早可开始时间 \*/  
 29  $q_1 \cdot e = q_1 \cdot b + q_1 \cdot D/r_{j_{\text{max}}}$ ; /\* 当前任务完成时间定为开始时间加数据传输时间 \*/  
 30 delete  $q_1$  from  $Q$ , and add  $q_1$  to  $T_{\text{succ}}$ ; /\* 将当前任务从调度队列删除并加入成功任务集 \*/  
 31 end if  
 32 update  $W_{i,j_{\text{max}}}$ ; /\* 更新资源可用时间窗口,详见文献[12] \*/  
 33 end while  
 34 return  $X, T_{\text{succ}}, T_{\text{fail}}$ ;

## 3 任务调度算例

### 3.1 算例设置

为检验前文模型与算法的有效性,在此构造一个中继卫星

任务调度算例。其中,中继卫星系统包括三颗运行于地球静止轨道的中继卫星 R-1、R-2、R-3,参数设置如表 1 所示。用户航天器为卫星工具包 (satellite tool kit, STK)<sup>[13]</sup> 数据库中导出的六颗低轨卫星 YAOGAN1~YAOGAN6,简记为 Y-1~Y-6。

表 1 中继卫星参数设置

资源标志	经度	数据传输速率/Mbps	天线状态切换时间/s
R-1	73°E	150	200
R-2	113°E	150	300
R-3	167°W	200	300

调度周期设置为 2016/10/18 00:00:00.00~2016/10/18 12:00:00.00,利用 STK 可计算在调度周期内各用户航天器与三颗中继卫星之间的可见时间窗口<sup>[14]</sup>,即资源的初始可用时间窗口。由于数目较多,在此仅列出 Y-1 与 R-1 间的可见时间窗口,如表 2 所示。

表 2 Y-1 与 R-1 间的可见时间窗口

序号	开始时刻	结束时刻	长度/s
1	00:04:44	01:02:48	3 484
2	01:39:17	02:41:37	3 740
3	03:08:28	05:34:27	8 759
4	05:38:13	06:50:36	4 343
5	07:23:45	08:23:21	3 576
6	09:01:30	09:58:48	3 438
7	10:38:17	11:35:17	3 420

在本算例中,假设每个用户航天器在调度周期内各提交 8 项任务需求,则中继卫星系统共需处理 48 项任务,设置编号为 1~48。在各任务需求中,任务重要度为 0~1 的随机数,数值越大表示重要度越高;任务待传输数据量为 100~500 Gb 的随机值;不同任务具有不同的紧迫性要求,最早允许开始时间与截止期在调度周期内随机取值,相同用户航天器提交的不同任务须满足各自需求限定区间无交叠。表 3 给出了 Y-1 的任务需求列表,其他用户航天器任务在此不再一一列出。

表 3 Y-1 的任务需求列表

任务编号	优先级	数据量/Gb	最早允许开始时间	最晚允许完成时间
1	0.467	233.6	00:40:00	01:17:24
2	0.169	389.6	01:56:53	02:59:16
3	0.358	484.8	03:27:27	04:45:04
4	0.705	158.0	04:54:53	05:20:10
5	0.827	484.4	05:59:22	07:16:55
6	0.995	476.8	07:52:33	09:08:53
7	0.436	256.4	09:15:36	09:56:39
8	0.902	161.2	10:09:18	10:35:07

任务优先级中的权重系数取值为: $\omega_p=0.5, \omega_u=0.3, \omega_t=0.2$ ;时间窗口优先级中的权重系数取值为: $\theta_j=0.4, \theta_s=0.6$ 。

3.2 调度结果

为了检验调度算法性能,将具有时效性要求的任务调度问题中的最早截止期优先 (earliest deadline first, EDF)<sup>[15]</sup> 算法以及多任务多资源调度问题中常用的最高价值优先 (highest value first, HVF)<sup>[16]</sup> 算法用于算例调度,作为 DLP 算法的对照。图 3 分别显示了三种算法的调度结果。图中矩形色块为调度成功的任务,其宽度表示任务执行时长,上方数字为任务编号,颜色代表任务来源,颜色相同的任务由同一用户提出(图 3 中未出现者为调度失败的任务,失败原因为资源可用时间窗口长度不足以完成任务数据传输)。由图 3 可知,在应对算例中随机生成的 48 项任务时,使用 DLP、EDF、HVF 三种算法时调度成功的任务数目分别为 33、31、30。由此可见,使用 DLP 算法得到调度方案具有更高的成功率。

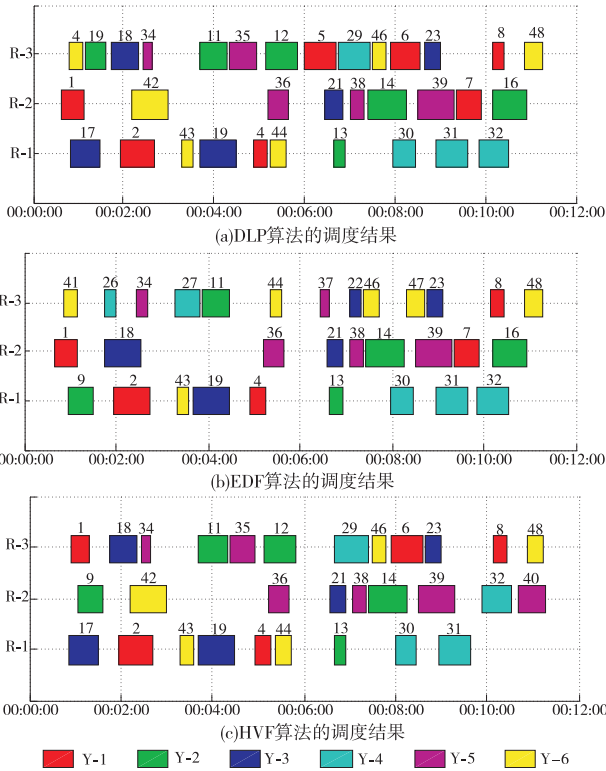


图 3 不同算法下的调度结果

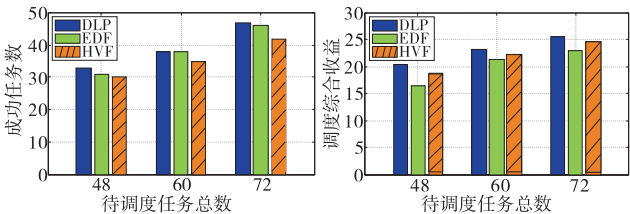


图 4 待调度任务总数不同时三种调度算法的成功任务数目

图 5 待调度任务总数不同时三种调度算法的调度综合收益

在图 3 调度结果的基础上,可进一步对比三种算法下调度失败的任务。根据表 4 中所列各算法失败任务的基本信息可知:

a) DLP 与 EDF 算法的对比。除两者共同的失败任务外, DLP 算法剩余失败任务 5 项,分别为任务 22、26、27、37 和 47,其中除任务 27 以外,其他任务的重要度均不高。EDF 算法剩余失败任务 7 项,分别为任务 5、6、12、17、29、35 和 42,其中除任务 42 外,其他任务均具有很高的重要度。因此相比 EDF 算法,在 DLP 算法下错过的高价值的任务明显更少。

b) DLP 与 HVF 算法的对比。除两者所共有的任务外, DLP 算法仅剩余任务 40,其重要度极低(0.097),且截止期很晚(11:27:55)。HVF 算法剩余失败任务 4 项,分别为任务 5、7、16 和 41,这些任务重要度均明显高于 0.097,且截止期亦均早于 11:27:55。因此相比 HVF 算法,在 DLP 算法下更多紧迫性要求高的任务得以调度成功。

由上述比较可见,在本算例中,DLP 算法比 EDF 算法和 HVF 算法获得了更优的调度方案。为了进一步验证算法的有效性,在上述算例的基础上,进一步将各用户航天器在调度周期内的任务需求数增加为 10 项和 12 项(对应待调度任务总数分别为 60 项和 72 项),得到两个新的算例,而后分别使用 DLP、EDF、HVF 算法对其开展调度。三种算法中在各算例中调度成功的任务数目及调度结果综合收益的对比如图 4、5 所示。

表 4 三种算法下调度失败的任务信息

DLP 算法失败任务				EDF 算法失败任务				HVF 算法失败任务			
编号	重要度	数据量	截止期	编号	重要度	数据量	截止期	编号	重要度	数据量	截止期
3	0.358	484.8	04:45:04	3	0.358	484.8	04:45:04	3	0.358	484.8	04:45:04
10	0.718	458.0	03:20:17	5	0.827	484.4	07:16:55	5	0.827	484.4	07:16:55
15	0.333	369.2	10:00:36	6	0.995	476.8	09:08:53	7	0.436	256.4	09:56:39
20	0.529	411.2	06:01:11	10	0.718	458.0	03:20:17	10	0.718	458.0	03:20:17
22	0.288	142.4	07:27:10	12	0.869	464.8	06:23:26	15	0.333	369.2	10:00:36
24	0.446	422.0	11:38:01	15	0.333	369.2	10:00:36	16	0.141	384.4	11:12:06
25	0.729	248.0	01:07:42	17	0.868	318.8	01:42:34	20	0.529	411.2	06:01:11
26	0.006	140.4	02:06:27	20	0.529	411.2	06:01:11	22	0.288	142.4	07:27:10
27	0.548	351.6	04:13:29	24	0.446	422.0	11:38:01	24	0.446	422.0	11:38:01
28	0.084	481.6	06:20:53	25	0.729	248.0	01:07:42	25	0.729	248.0	01:07:42
33	0.082	471.6	01:58:47	28	0.084	481.6	06:20:53	26	0.006	140.4	02:06:27
37	0.386	108.4	06:44:02	29	0.840	486.4	07:45:56	27	0.548	351.6	04:13:29
40	0.097	304.8	11:27:55	33	0.082	471.6	01:58:47	28	0.084	481.6	06:20:53
45	0.724	486.4	07:23:24	35	0.658	381.6	04:56:05	33	0.082	471.6	01:58:47
47	0.337	282.8	09:02:28	40	0.097	304.8	11:27:55	37	0.386	108.4	06:44:02
				42	0.355	406.8	03:16:34	41	0.290	164.4	01:17:12
				45	0.724	486.4	07:23:24	45	0.724	486.4	07:23:24
								47	0.337	282.8	09:02:28

由图 4.5 可见,在待调度任务总数不同的三个算例中,使用三种算法开展调度时,a) DLP 算法在成功任务数和调度综合收益方面均优于 EDF 和 HVF 算法;b) EDF 算法在成功任务数方面均优于 HVF 算法;c) EDF 算法在调度综合收益方面均次于 HVF 算法。造成上述结果的原因在于:a) EDF 算法重点关注任务紧迫性,在调度中会优先令截止期早的任务满足执行条件,因而可使较多的任务调度成功,但由于其忽略了任务价值,导致调度结果的综合收益偏低;b) HVF 算法着重关注任务价值的高低,因而在调度中将优先保证高价值任务满足执行条件,而忽略了任务截止期是否逼近,所以虽可获得较高的综合收益,但成功任务数为三种算法中最少;c) DLP 算法在任务层面兼顾了任务价值高低与紧迫性,还考虑了任务调度难度对结果可能产生的影响,同时在资源层面优先选择利用率更高、服务更及时的资源,这些措施令成功任务数和调度综合收益均得以提升。

#### 4 结束语

本文针对中继卫星系统任务调度问题,建立模型并提出一种基于任务—时间窗口双层优先级的调度算法。根据仿真算例调度结果可知,相比最早截止期优先的算法与最高价值优先的算法,本文算法保证了更多高价值、高紧迫性任务的执行条件,从而使更多的任务调度成功,所以得到了更优的调度方案。此外,在待调度任务总数变化时,本文算法仍在成功任务数和调度综合收益两方面优于另外两种算法,所以算法的有效性得到了验证。但本文研究仍存在一定的局限性,下一步研究体现在:a)本文对中继卫星系统作了一些简化假设,且除文中已考虑的问题之外,目前中继卫星系统应用中还有混合链路<sup>[17]</sup>、多址天线<sup>[18]</sup>、数据下传调度等实际问题有待进一步研究;b)本文调度算法主要关注调度结果的提升,而一定程度上忽略了算法的执行效率,下一步拟将算法与高效的智能算法结合,以期提高任务调度效率。

#### 参考文献:

- [1] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116.
- [2] 王家胜. 我国数据中继卫星系统发展建议[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 1-8.
- [3] Surhone L M, Timpelton M T, Marseken S F. Tracking and data relay satellite[J]. Dictionary Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 276-289.
- [4] Teles J, Samii M V, Doll C E. Overview of TDRSS[J]. Advantages of Space Research, 1995, 16(12): 67-76.
- [5] Rojannasoonthon S, Berd J F, Reddy S D. Algorithms for parallel machine scheduling: a case of the tracking and data relay satellite system[J]. Journal of the Operation Research Society, 2003, 54(8): 806-821.
- [6] Rojannasoonthon S, Berd J. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows[J]. INFORMS Journal on Computing, 2005, 17(1): 32-51.
- [7] Lin Peng, Kuang Linling, Chen Xiang. Adaptive subsequence adjustment with evolutionary asymmetric path-relinking for TDRSS scheduling[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(5): 800-810.
- [8] 陈理江, 武小悦, 李云峰. 基于时间灵活度的中继卫星调度算法[J]. 航空计算技术, 2006, 36(4): 48-51.
- [9] 赵静, 赵卫虎, 李勇军, 等. 微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 138-145.
- [10] 开彩虹, 肖瑶, 方青. 基于人工蜂群算法的中继卫星任务调度研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2466-2474.
- [11] 方炎申, 陈英武, 顾中舜. 中继卫星调度问题的 CSP 模型[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 6-10.
- [12] 赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 一种基于时间窗口更新的激光链路中继卫星资源调度算法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 80-87.
- [13] 熊伟, 刘德生, 简平, 等. 空间信息系统建模仿真与评估技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 207-209.
- [14] 李志强, 吴曦, 荣明, 等. 基于信息系统体系对抗 STK 基础仿真应用[M]. 北京: 军事科学出版社, 2014: 125-126.
- [15] Jensen E D, Locker C D, Tokuda H. A time-driven scheduling model for real-time operating systems[C]//Proc of IEEE Real-time Systems Symposium. 1985: 112-122.
- [16] Baker T P. An analysis of EDF schedulability on a multiprocessor[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(8): 760-768.
- [17] 赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星间激光链路数据中继技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3103-3110.
- [18] 林鹏, 晏坚, 费立刚, 等. 中继卫星系统的多星多天动态调度方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(5): 491-496, 502.