

微波与激光混合链路中继卫星动态调度快速启发式算法

赵卫虎 赵 静 赵尚弘 李勇军 韩 磊 董 毅

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要 针对微波与激光混合链路中继卫星系统实际应用中的动态变化,分析了混合系统动态扰动条件,依据中继卫星资源调度动态调整原则,研究了混合系统动态资源调度策略。以最大化调度任务优先级之和,以及扰动发生后对初始方案扰动变化最小为目标,建立了具有两级优化目标的混合系统动态调度模型。提出了动态插入快速启发式算法并对模型求解算法,算法包括直接插入任务操作、移动插入任务操作和删除插入任务操作。仿真结果表明与完全重新调度的算法相比,动态插入算法的方案变化率平均降低了 60.10%,且计算速度明显高于重新调度算法,能够有效解决混合链路中继卫星系统动态调度问题。

关键词 光通信;微波与激光混合链路;中继卫星;动态调度;扰动;启发式算法

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905007

Dynamic Scheduling Fast Heuristic Algorithm for Data Relay Satellite with Microwave and Laser Hybrid Links

Zhao Weihu Zhao Jing Zhao Shanghong Li Yongjun Han Lei Dong Yi

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract According to the dynamic variations in the application of the data relay satellite system with microwave and laser hybrid links, the dynamic disturbance conditions are analyzed and the dynamic resource scheduling method is discussed based on the dynamic adjustment principles of resource scheduling. To maximize the sum of scheduling tasks priorities, as well as to minimize the variations in scheduling scheme, a hybrid system dynamic scheduling model with two levels optimization target is established. A dynamic inserting fast heuristic algorithm under multi-class disturbance is proposed, which includes the directly inserting tasks operation, shifting and inserting tasks operation, deleting and inserting tasks operation. The results show that the optimization results of dynamic insert algorithm are superior to the rescheduling algorithm in rate of scheme change, which is reduced by 60.10%. The computing speed of the dynamic insert algorithm is superior to the rescheduling algorithm obviously, which could effectively solve the dynamic scheduling problem in data relay satellite system with hybrid links.

Key words optical communications; microwave and laser hybrid links; data relay satellite; dynamic resources scheduling; disturbance; heuristic algorithm

OCIS codes 200.2605; 200.3050; 200.3760

1 引 言

随着宽带宽、大容量、低功耗卫星激光通信的快速发展^[1-3],星间激光中继技术将与成熟的微波卫星通信系统相结合,为构建安全高效的天基信息网

络、实现全球范围无缝覆盖和高速中继接入提供新的手段^[4-6]。而在这种微波与激光混合链路中继卫星系统中,优化资源调度则是实现天基信息系统数据可靠传输和资源高效利用的关键与难点所在^[7]。

收稿日期: 2013-12-26; 收到修改稿日期: 2014-04-01

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介: 赵卫虎(1986—),男,博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: zhaoweihuandy@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信与激光技术等方面研究。

E-mail: Zhaoshangh@yahoo.com.cn

针对资源调度问题,学者提出了一系列算法^[8]。文献[9]分析了卫星通信的调度、优化和去冲突的一些原则和方法,对实例进行了深入分析,然而其算法优化效率相对较低。文献[10]针对不确定条件下的成像卫星调度问题,建立了成像卫星动态调度模型并通过仿真验证了算法有效性。文献[11]针对并行机调度问题提出了基于贪婪随机自适应搜索的方法,实现了任务间隔的最小化,此方法可为解决中继卫星资源调度问题提供有效途径。然而,当前关于卫星调度问题的研究一般基于微波链路,并且多为静态调度,即假设资源调度开始后,调度任务与天线资源不再改变,在一个调度周期内,卫星将严格执行调度方案分配中继卫星资源以满足用户卫星任务传输需求。虽然卫星运行具有一定规律,中继卫星的调度任务也是可以预计的,但是在中继卫星系统的实际应用中,卫星资源本身的状态和用户的任务需求都是不断发生变化的,特别是在具有激光链路的中继卫星系统中,空间激光束对准难度大,同时卫星平台的振动会对星间激光链路带来很大的影响,导致通信链路误码率增大,甚至造成链路中断^[12]。这些变化在调度过程中难以预料且无法避免,如果卫星调度无法适应这些变化,调度结果的有效性、资源利用率将会大大降低,甚至导致调度方案无法执行。因此,本文针对混合链路中继卫星系统资源和任务动态变化的特点,研究了中继卫星系统资源动

态资源调度问题,提出了一种动态插入快速启发式算法。分析了混合链路条件下的各类扰动条件,根据中继卫星动态调整原则,探讨了混合链路中继卫星动态调度策略;建立了动态约束满足问题(DCSP)模型,对调度问题进行描述,并针对该模型提出了动态插入快速启发式算法,最后通过仿真验证了该算法的有效性。

2 混合链路动态调度的动态约束满足问题模型

在微波与激光混合链路中继卫星系统中,会有各类动态变化情况发生,如新任务增加、资源故障、链路误差及平台振动等情况,导致初始调度方案无法执行。虽然变化因素种类繁多,但最终都可以将各类情况转化为资源调度约束中资源集和任务集的改变,将中继卫星的动态调度问题归结为新任务插入问题。因此混合系统中继卫星的资源调度过程如图1所示,主要分为两个部分:静态调度和动态调度。

1) 静态调度过程:首先根据初始任务集和资源建立静态初始调度模型,然后采用多目标优化算法进行求解,获得资源调度问题的初始调度方案。

2) 动态调度过程:针对调度过程中出现的多种动态扰动情况,实时改变调度模型中的资源与任务集,并根据初始调度模型中各种任务及资源约束,采用快速启发式算法得到动态改变后的最终方案。

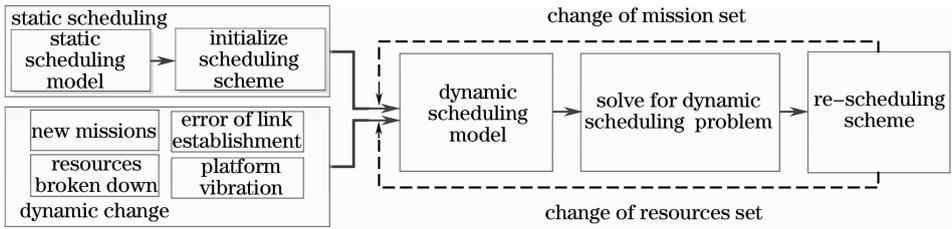


图1 动态调度的主要流程

Fig.1 Dynamic scheduling flow chart

2.1 静态调度问题的约束满足问题模型

微波与激光混合链路中继卫星资源调度问题受到可见时间窗口、任务优先级、终端功耗等约束,可以看作一类多目标约束满足问题(CSP)。调度方案应保证未完成任务总优先级权值尽可能低。由于中继卫星星上存储容量限制,且调度具有一定时效性要求,调度目标要求系统终端资源总能耗尽可能小,同时应保证系统任务调度完成时间尽量短。基于以上考虑,混合系统资源调度问题可用四元组 $\Theta_0 = \{J, M, T_w, C\}$ 表示。其中 J 为用户星上所有任务集合; M 为天线资源集合; T_w 为可见时间窗口集合,

$T_w \in [T_{w1}, T_{w2}, \dots, T_{w|J|}]$, $|J|$ 代表任务数量,

$$T_{wi} = \bigcup_{k=1}^{n_i} [t_{sw,i}^k, t_{ew,i}^k], i \in 1, 2, \dots, |J|, [t_{sw,i}^k, t_{ew,i}^k]$$

为任务 i 的第 k 个可见时间窗口,其中 $t_{sw,i}^k$ 和 $t_{ew,i}^k$ 分别为可见时间窗口的开始和结束时间; C 为约束集合。

2.1.1 具体参数说明

$[a_i, b_i]$:任务 i 的有效时间范围。

S :用户卫星集合, $|S| = N$, N 代表用户卫星数量。

T_e :所有任务完成调度的结束时刻。

J_s :用户星 s 上发起的任务子集, $s \in S$ 。

p_i : 任务 i 的优先权值, $i \in J$ 。

M : 中继卫星上天线资源集合, M 代表资源数量。

n_i : 任务 i 的可见时间窗口数量, $i \in J$ 。

$[T_S, T_E]$: 调度周期, T_S 和 T_E 分别为调度开始时间和结束时间。

$t_{d,i}^m$: 任务 i 在天线 m 上执行的传输时间, $i \in J$, $m \in M$ 。

T_D : 调度持续时间, $T_D = T_E - T_S$ 。

$t_{s,i}$: 任务 i 传输开始时刻。

E_B : 调度初始时中继卫星上存储的能量。

Q_i : 中继星执行完任务 i 后, 当前星上存储容量。

P_c^m : 天线 m 的平均功耗, $m \in M$ 。

P_s^m : 天线 m 的切换功耗, $m \in M$ 。

C_r : 中继星的总存储容量。

$t'_{s,m}$: 天线 m 连续执行任务所需的切换时间, $m \in M$ 。

P_g : 中继卫星运行过程中获得的平均功率。

q_i : 任务 i 的数据量。

E_s^m : 中继卫星上的天线 m 连续执行任务所需的切换能耗, $m \in M$ 。

x_i^k : 任务调度标识符, 如果任务 i 其第 k 个可见时间窗口内执行, $x_i^k = 1$; 否则 $x_i^k = 0$ 。

y_{ij} : 任务连续执行标识符, 如果任务 i 与任务 j 连续执行且任务 j 在任务 i 后执行, 则 $y_{ij} = 1$; 否则 $y_{ij} = 0$ 。

2.1.2 多目标约束规划模型

基于上述调度原则及定义, 建立微波与激光混合链路中继卫星系统多目标约束模型如下:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } f_1 &= \sum_{s \in S} \sum_{k \in \{1, 2, \dots, n_i\}} \sum_{i \in J_s} (1 - x_i^k) p_i, \\
 \text{Min } f_2 &= \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{i \in J_s} (P_c^m \cdot t_{d,i}^m + P_s^m \cdot t'_{s,m}), \\
 \text{Min } f_3 &= T_e, \\
 \text{s. t. } C_t &= (\forall i \in J) \left(\sum_{k \in \{1, 2, \dots, n_i\}} x_i^k \leq 1 \right), \\
 C_w &= (x_i^k = 0) \cup (t_{sw,i}^k \leq t_{s,i} \leq t_{ew,i}^k - t_{d,i}^m), i \in J, k \in \{1, 2, \dots, n_i\}, m \in M, \\
 C_s &= (\forall i, j \in J, m \in M) (t_{s,j} = t_{s,i} + t_{d,i}^m + t'_{s,m}), \text{ if } y_{ij} = 1, m \in M, \\
 C_{\text{temp}} &= T_S \leq t_{s,i} \leq T_E, T_S \leq t_{s,i} + t_{d,i}^m \leq T_E, \\
 C_e &= (\forall s \in S) \left(\sum_{m \in M} \sum_{i \in J_s} P_c^m \cdot t_{d,i}^m + \sum_{m \in M} E_s^m \leq E_B + P_g \cdot T_D \right), \\
 C_b &= (\forall i, j \in J) [y_{ij} \cdot (q_j + Q_i) \leq C_r], \\
 C_a &= (x_i^k = 0) \cup (a_i \leq t_{s,i} \leq b_i, a_i \leq t_{s,i} + t_{d,i}^m \leq b_i, i \in J), \\
 C &= C_c \cap C_w \cap C_s \cap C_{\text{temp}} \cap C_e \cap C_b \cap C_a.
 \end{aligned} \tag{1}$$

上述模型中, s. t. 表示约束条件; 目标函数 f_1 代表调度的目标是保证系统未完成任务优先级尽可能少, 即完成尽可能多的高优先级任务; 目标函数 f_2 代表调度的目标是保证系统终端资源总能耗最小; 目标函数 f_3 代表调度的目标是保证系统任务调度完成时间最短; 约束 C_t 为任务传输约束, 每个任务在其可见时间窗口中仅选取一个时间窗口进行传输, 每个任务只执行一次; 约束 C_w 为时间窗口约束, 任务传输必须在中继星与用户星的可见时间窗口内进行; 约束 C_s 为切换时间约束, 同一天线上任何连续执行的任务必须满足切换时间; 约束 C_{temp} 表示所有的通信任务必须在给定的调度时间段 $[T_S, T_E]$ 内安排调度; 约束 C_e 表示中继卫星通信活动应满足的能量约束条件; 约束

C_b 为卫星存储容量约束, 强制每个任务都不能使当前已占用存储容量超过卫星存储总量; 约束 C_a 为任务有效性约束, 保证每个执行的任务都能在有效时间内完成。另外, 本文中中继卫星资源调度问题研究中假设中继卫星与地面站之间链路实时可用, 因此数据任务传输至中继卫星上可实时上传至地面站, 即满足星上存储容量约束。

2.2 动态调度问题的动态约束满足问题模型

中继卫星的动态调度问题可用六元组 $\Theta_{\text{new}} = \{\Theta_0, S_0, J_{\text{new}}, M_{\text{new}}, T_{W,\text{new}}, C_{\text{new}}\}$, 其中 Θ_0 为原问题; S_0 为原问题的解, 即静态调度方案; J_{new} 为新增加的任务集合, 包括原方案中由于资源故障或链路质量下降导致需要重传的任务及新增的突发性任务,

$T_{w, new}$ 为其对应的时间窗口; M_{new} 为由于资源故障而更新的当前天线资源集合; C_{new} 为原约束集合 C 的扩展, 主要是由于链路质量下降和资源故障导致的任务执行约束改变。

定义动态调度模型的目标函数如(2)式所示, 目标函数 O 是最大化调度任务优先级之和。目标函数 δ_1 和 δ_2 是最小化扰动变化。即在不影响调度任务优先级之和的情况下, 使初始方案的扰动变化最小。其中 δ_1 目标是最小化删除任务优先级之和, n_{del} 为被删除的任务总量, δ_2 目标是最小化移动任务量, n_m 为被移动任务总量。

$$\begin{aligned} \text{Max } O &= \sum_{i \in J} x_i^k p_i, \\ \text{Min } \delta_1(S_0, S_{new}) &= \sum_{i=1}^{n_{del}} x_i^k p_i, \\ \delta_2(S_0, S_{new}) &= n_m. \end{aligned} \quad (2)$$

3 动态插入快速启发式算法

混合系统中卫星动态调度问题是一个复杂的组

合优化问题, 为满足动态调度中最高优先级完成原则、初始调度方案最小变化原则和快速调度原则, 在满足任务传输要求和终端资源约束的前提下, 以初始调静态方案为基础, 根据各类扰动因素更新任务集和资源集, 将动态调度原则作为相关启发式信息, 提出基于动态插入的快速启发式算法, 并按照插入方式的不同将其分解为三个相应的插入操作, 分别为直接插入任务操作、移动插入任务操作和删除插入任务操作, 算法具体流程如图 2 所示。

3.1 直接插入任务操作

直接插入任务操作的基本思想是, 在不改变当前调度方案任务安排的资源、时间窗口及调度顺序的前提下, 按照新任务优先级从高到低的顺序, 依次判断新任务集中的任务能否在满足所有调度约束的条件下, 直接插入到其可用资源的任务调度安排中。在插入任务时, 根据任务可见时间窗口的开始时间及已安排调度任务的调度完成时刻, 确定插入点次序, 以尽可能避开任务冲突, 提高算法搜索效率。直接插入操作流程如图 3 所示。

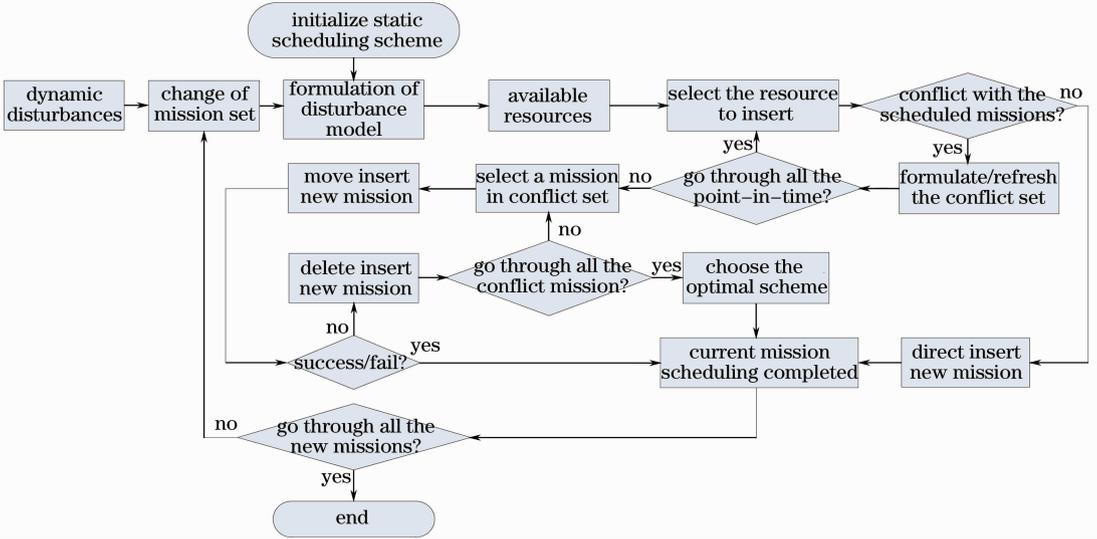


图 2 动态插入快速启发式算法流程图

Fig. 2 Dynamic insert fast heuristic algorithm flow chart

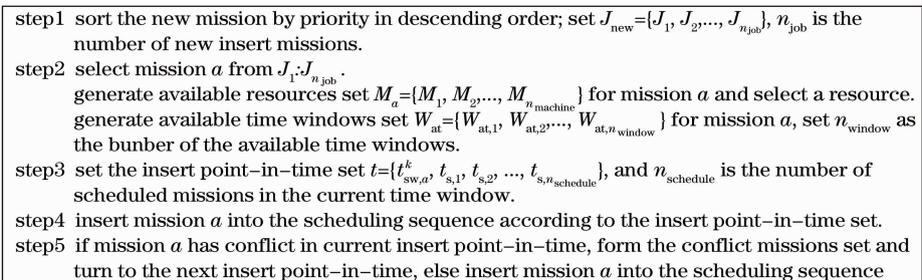


图 3 直接插入任务操作流程

Fig. 3 Direct insert mission operation flow chart

3.2 移动插入任务操作

移动插入任务操作的基本思想是：对于无法直接插入的新任务，利用资源调度问题具有多天线资源、多可见时间窗口的特点，尝试将与其冲突的旧任

务无冲突地移动至另一时间窗口，使得新任务能够插入。为避免冲突的传递和保证算法的效率，移动插入操作的搜索深度为 1 个任务，其具体流程如图 4 所示。

step1	back to the conflict missions set, and obtain the conflicted mission sequence with mission <i>a</i> .
step2	move each mission in the conflict mission set to its available time window of its available resources.
step3	if the movement has a conflict, and the movement is failed, go to the operate of delete insert mission, the mission number adds 1 and turn to step2. else, the movement is successful.

图 4 移动插入任务操作流程

Fig. 4 Remove insert mission operation flow chart

3.3 删除插入任务操作

对于动态调度问题，调度目标是调度尽可能多的高优先级任务，同时获得的新方案与初始调度方案改变最小。然而在很多时候，通过上述两个算法无法实现新任务的全部插入，这时如果存在无法插

入的高优先级任务，则通过删除插入任务算法遍历冲突集中所有与该任务冲突的任务，按照调度方案总体评价最优原则，删除冲突任务，插入高优先级任务。删除插入任务算法的流程如图 5 所示。

step1	delete the current conflict mission and insert the new mission, set the current scheduling scheme as a temporary scheme, calculate the value of the scheme and insert it into the value set.
step2	judge whether all the conflict missions in the conflict set have been tested.
step3	if the missions are not tested all, back to the conflict set, turn to the operate move insert mission and go through all the conflict missions. else, select the scheme with the max evaluate value as the final scheme

图 5 删除插入任务操作流程

Fig. 5 Delete mission insert operation flow chart

4 仿真及结果分析

4.1 仿真场景

采用 1 颗中继星，4 颗用户星的场景开展仿真实验，卫星的轨道数据来源于美国分析制图公司 (AGI) 公司于 2010 年 6 月发布的全球卫星轨道数据库，选取定位东经 10° 的中继卫星，设星上载有 3 个天线资源，天线类型分别为 S 波段、Ku 波段和光学天线，设天线均为单址天线。根据欧空局的欧洲数据中继卫星 (EDRS)^[7] 中激光链路性能参数，设定终端具体参数如表 2 所示。仿真时段为 00 : 00 : 00 ~ 06 : 00 : 00，用户卫星参数从 STK (Satellite ToolKit)

导入，进行可见性分析可得中继卫星与用户星间的可见时间窗口，如表 3 所示。选取任务数量为 32 的场景进行仿真，采用静态资源调度算法得到初始调度方案。设初始调度方案发布确定后，在任务执行前增加了 4 个新任务，具体参数如表 4 所示。

表 2 天线终端参数

Table 2 Key performance parameters of the antenna

Antenna	S	Ku	Optical
Date rate / (Mb/s)	10	200	1800
Power consumption / W	500	500	100

表 3 用户星可见时间窗口

Table 3 View period window of user satellites

User satellite	LEO 01 (400 km/30°)	LEO 02 (600 km/45°)	LEO 03 (800 km/60°)	LEO 04 (1000 km/75°)
View period windows	00 : 00 : 00 — 00 : 10 : 00 00 : 52 : 36 — 01 : 48 : 55 02 : 31 : 33 — 03 : 26 : 50 04 : 09 : 29 — 05 : 04 : 24 05 : 47 : 03 — 06 : 00 : 00	00 : 18 : 48 — 01 : 18 : 17 02 : 00 : 12 — 03 : 00 : 32 03 : 42 : 00 — 04 : 44 : 51 05 : 25 : 38 — 06 : 00 : 00	00 : 00 : 00 — 00 : 45 : 32 01 : 23 : 17 — 02 : 40 : 37 03 : 16 : 41 — 04 : 31 : 52 05 : 10 : 29 — 06 : 00 : 00	00 : 00 : 00 — 00 : 25 : 54 00 : 59 : 40 — 02 : 13 : 57 02 : 53 : 26 — 04 : 01 : 48 04 : 42 : 52 — 05 : 50 : 35

表 4 新增任务具体参数

Table 4 View period window of user satellites

New mission	Priority	Satellite	Data size of mission /Gbit
J_{33}^*	9	LEO 01	250
J_{34}^*	8	LEO 02	600
J_{35}^*	8	LEO 03	150
J_{36}^*	6	LEO 04	300

表 5 新增任务调度情况

Table 5 Scheduling situation of new missions

New mission	Scheduling operation	Influenced mission	Relay time period
J_{33}^*	Remove insert	J_9, J_{13}	00 : 52 : 36 — 01 : 34 : 17
J_{34}^*	Delete mission	J_{30}	05 : 49 : 26 — 05 : 56 : 06
J_{35}^*	Direct insert		02 : 28 : 20 — 02 : 31 : 15
J_{36}^*	Remove insert	J_{31}	04 : 58 : 24 — 05 : 48 : 25

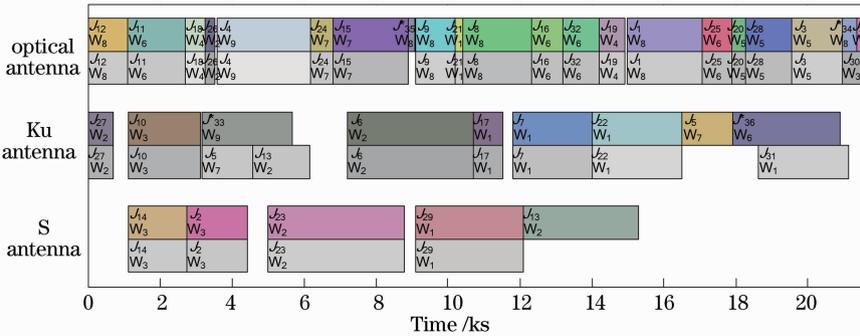


图 6 动态插入调度方案甘特图

Fig. 6 Dynamic insert scheduling results

定义“方案变化率”为变化任务量与初始总任务量之比,在此次动态调度中,任务 J_{30} 直接删除未被调度,其余所有任务均完成调度安排,三个任务调度

时间改变,方案变化率为 9.3%。同时根据完全重调度算法对动态调度问题进行求解,得到问题重调度方案如图 7 所示。

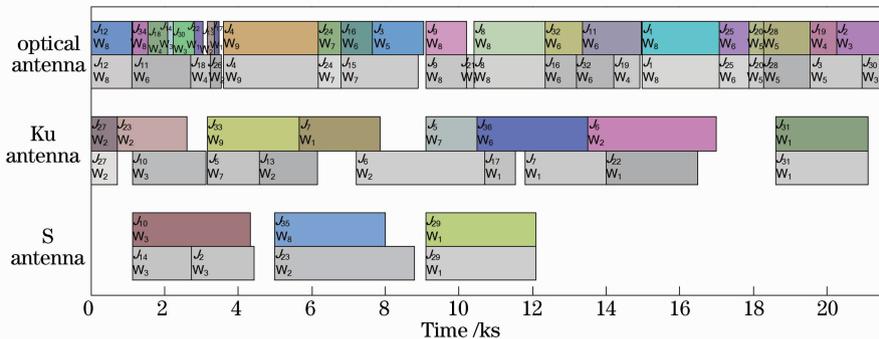


图 7 完全重调度方案甘特图

Fig. 7 Results of re-scheduling all missions

在此次完全重调度中,任务 J_{15} 、 J_{26} 和 J_{21} 未被调度,其余所有任务均完成调度安排,完全重调度方案中仅有 10 个任务调度时间与初始调度方案相同,方案变化率为 68.7%。由此可见,完全重调度对初

始调度方案改变很大,导致绝大部分的用户星计划改变,可能给整个系统带来连锁反应,严重影响系统的稳定性。而动态插入快速启发式算法对方案影响很小,具有很强的稳健性。

为验证动态插入算法求解多类扰动下资源调度问题的有效性,分别取任务规模为 24, 32, 40, 48, 64 的场景进行仿真分析。表 6 比较了在相同初始方案

和新增任务数量条件下,动态插入算法与完全重调度算法的动态调度结果。

表 6 算法调度结果对照表

Table 6 Comparison list of scheduling results

Number of initialize mission	Number of new mission	Re-scheduling all missions			Dynamic insert scheduling		
		Total priority	Rate of change	Calculating time /s	Total priority	Rate of change	Calculating time /s
24	4	126	66.67%	6.1701	126	0	0.2011
32	4	172	68.70%	11.3286	167	9.37%	0.2054
40	4	211	70.00%	15.4313	208	12.50%	0.2108
48	8	252	72.90%	19.6702	250	14.53%	0.2145
64	8	298	73.52%	29.4258	295	15.62%	0.2238

从表 6 可以看出,本文提出的动态插入算法的调度结果具有任务改变量较少的优势。在不同任务规模的场景中,调度结果中调度任务总优先级权值均高于完全重调度算法,且计算速度明显高于重调度算法。由对比结果可知,动态插入算法所得结果中方案变化率相比与完全重调度算法平均降低了 60.10%,调度计算用时远远低于完全重调度算法;对比不同任务规模条件下的方案变化率可知,随着任务规模的不断增大,完全重调度算法调度结果中调度计算用时呈增加趋势,而动态插入算法调度结果中调度计算用时随任务规模改变很小,因而动态插入算法能够在快速调度的条件下保持初始调度方案的稳定性,同时获得最大化调度任务总优先级权值。

5 结 论

针对中继卫星系统动态扰动的特点,将各类扰动转化为新任务增加以进行动态处理,并建立了动态约束规划模型,提出了动态插入快速启发式算法。算法采用启发式方法,将其分为直接插入、移动插入和删除插入三个操作过程;设置移动插入操作为一个任务的搜索深度,从而实现实时动态处理,并减小新调度方案的变化率。仿真结果表明本文提出的动态插入算法适用于解决具有多种动态变化情况的微波与激光混合链路中继卫星动态调度问题,能够在快速调度的条件下保持初始调度方案的稳定性,同时获得尽可能高的调度任务总优先级权值。

参 考 文 献

- 1 R J Cesarone, D S Abraham, S Shambayati, *et al.*. Deep-space optical communications[C]. International Conference on Space Optical Systems and Application, 2011, 8: 410-423.
- 2 Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite[C]. SPIE, 2011, 7923: 79230B.

- 3 Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, *et al.*. Laser communication terminals for the European data relay system[C]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- 4 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Scheduling algorithm for data relay satellite based on view period window refreshing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110602.
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): 110602.
- 5 Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, *et al.*. Multi-objective resources scheduling algorithm for microwave and laser hybrid links data relay satellite based on improved NSGA-II algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1205003.
赵 静, 赵卫虎, 李勇军, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的微波/光混合链路中继卫星多目标资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1205003.
- 6 Wang Jiasheng. China's data relay satellite system and its application prospect[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(1): 1-6.
王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展[J]. 航天器工程, 2013, 22(1): 1-6.
- 7 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. A survey on scheduling for TDRS[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(11): 1837-1843.
赵 静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 中继卫星资源调度问题研究现状与展望[J]. 电讯技术, 2012, 52(11): 1837-1843.
- 8 Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, *et al.*. Scheduling algorithm for data relay satellite with microwave and laser hybrid links[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005005.
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): 1005005.
- 9 Dick Stottler. Satellite communication scheduling, optimization, and deconfliction using artificial intelligence techniques [C]. AIAA Infotech@Aerospace 2010. 1-9.
- 10 Wang Junmin, Wang Peng, Li Jufang. Research on robust scheduling strategy of imaging satellites[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 109-114.
王军民, 王 鹏, 李菊芳. 成像卫星稳健性调度策略研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 109-114.
- 11 S Rojanasoonthon, J Bard. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows[J]. Journal on Computing, 2005, 17(1): 32-51.
- 12 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 147-155.
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 147-155.

栏目编辑:王晓瑛