

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

赵 静 赵尚弘 李勇军 赵卫虎 韩 磊 李 轩

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要 针对激光链路中继卫星资源调度问题,以中继卫星系统资源、任务和约束条件为参量,以任务对资源的选择为优化对象,采用在调度过程中不断更新后续任务可用时间窗口的调度方法,建立了激光链路中继卫星资源调度的约束规划模型并提出了一种基于时间窗口更新的调度算法。综合考虑多时间窗口、多天线终端以及任务优先级,算法基于“当前任务调度时间的确定”和“后续任务可见时间窗口的更新”,对不同资源的任务集合进行调度安排并实现了可见时间窗口的动态更新,获得调度任务的总优先级并将其作为参量计算适应度值,最后通过遗传算法对不同调度方案进行寻优,获得最优调度结果。以4颗用户星、3个天线、32个任务为条件设置了仿真场景,仿真结果表明该算法在收敛速度、调度效率方面具有优势,适应于多用户星、多天线终端的激光链路数据中继卫星资源调度。

关键词 光通信;数据中继卫星;资源调度;时间窗口更新

中图分类号 TP390 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110602

Scheduling Algorithm for Data Relay Satellite Based on View Period Window Refreshing

Zhao Jing Zhao Shanghong Li Yongjun Zhao Weihu Han Lei Li Xuan

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

Abstract According to the resources, missions and restraints, a scheduling algorithm based on view period windows refreshing is put forward and the model is established. Considering the multi-window multi-antenna structure and mission priority (PRI), the mission is scheduled reasonably and the time window is refreshed by the scheduling operation: the confirmed operator of current mission scheduling time and the refreshing of the following mission view period window. The PRI is considered as parameter in cost calculation and the scheduling project is optimized by genetic algorithm. The simulation scene includes 4 user satellites, 3 antennas and 32 missions. The simulation result reveals that the algorithm can obtain satisfactory results in both time and optimization, which is suitable in multi-mission and multi-antenna recourse scheduling.

Key words optical communications; data relay satellite; resources scheduling; view period window refreshing

OCIS codes 060.2605; 200.3050; 200.3760

1 引言

数据中继卫星系统作为未来天基综合信息网的主体,直接决定海量数据信息的转发处理能力^[1-3]。为满足星间大容量数据传输的需求,星间激光链路成为下一代数据中继卫星系统发展的主要方向。近几年,发达国家相继开展了具有星间激光链路的数据中继卫星系统的理论研究和星上演示验证,并启动了相应的工程验证计划^[4-5]。在激光链路数据中继卫星系统中,星间采用激光链路能充分发挥激光在太空的极大带宽

收稿日期: 2013-05-18; **收到修改稿日期**: 2013-07-13; **网络出版日期**: 2013-10-15

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介: 赵 静(1988—),女,硕士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: panpasil26@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的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

优势和良好的传输特性;同时为了突破目前星地微波链路接入的带宽和容量限制,需要积极发展装备有光学自适应系统的光学地面站,通过地球同步轨道卫星-地面之间的激光链路来扩展数据速率,由此共同构建高速数据中继系统^[6-9]。随着卫星激光链路通信的不断发展和多星组网的趋势,中继卫星资源的资源调度优化问题显得日益迫切和重要。

激光链路数据中继卫星资源调度问题是一个复杂的多目标组合优化问题,需要考虑可见时间窗口、任务优先级(PRI)、调度周期等约束。可见时间窗口是中继卫星调度中一个重要的约束条件,数据中继只有在用户星与中继卫星之间能够直视时进行,即必须具有可见时间窗口。由于激光载波频率高,星上激光链路实时处理传输能力在 Gb/s 量级,相对于传统的微波天线资源,任务传输所需时间将大大缩短。同时由于激光束发散角比微波波束发散角小 3~5 个数量级,空间激光束对准难度大,卫星之间需要依靠空间光捕获、跟踪、瞄准技术来保证星间可靠激光链路的建立,而链路建立时间通常达到数十秒甚至百秒量级^[10]。因此在资源调度中,需要考虑终端切换所导致的链路建立时间对可见时间窗口的影响,动态调整调度方案以制定出满足中继卫星应用任务需求的资源分配和活动调度方案。当前关于卫星资源调度问题的研究都只针对微波链路^[11]。文献[12-13]针对美国的跟踪与数据中继卫星系统,采用并行机调度理论对中继卫星调度问题进行研究,但模型中仅研究了不多于两个时间窗口的调度问题,且没有考虑任务优先级差异。文献[14]基于约束满足理论,建立了中继卫星调度问题的约束满足问题(CSP)模型并对模型进行求解,有效解决了中继卫星单址链路调度问题,但因算法全面考虑各类约束,因此其计算开销较大。文献[15]提出了一种基于任务时间灵活度的中继卫星调度算法,其主要思想是动态调节已调度任务在时间窗口的位置,以确保调度更多的任务。

本文针对激光链路中继卫星资源调度问题,以优先调度优先级权值高、通信时间短的任务为原则,以所有任务选择的资源为优化对象,以更新任务调度后对后续任务的时间窗口的影响为调度策略,建立了约束规划模型,提出了一种基于时间窗口更新的资源调度算法。仿真实验表明本算法在收敛速度、调度效率方面具有优势,能够有效解决多用户星、多终端的激光链路中继卫星资源调度问题。

2 约束规划模型

中继卫星资源调度问题可以看作一类约束满足问题。约束满足问题是计算机科学和人工智能研究的核心问题之一,现实生活中的许多组合调度优化问题都可以描述为约束满足问题。

2.1 参数说明

模型中涉及的参数定义如下。

S : 用户卫星集合, $\|S\| = N$, N 表明可以进行任务传输的用户卫星数量。

J : 用户星上所有任务集合。

J^s : 用户卫星 s 上发起的任务集合, $s \in S$ 。

M : 天线终端资源集合。

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

T_e : 所有任务完成调度的结束时刻。

p_i : 任务 i 的优先级, $p_i \in \{1, 2, \dots, 10\}$, $i \in J$ 。

n_i : 任务 i 的可见时间窗口数量, $i \in J$ 。

W_i : 时间窗口集合, $W_i = \bigcup_{k=1}^{n_i} [S_i^k, E_i^k]$, $[S_i^k, E_i^k]$ 为任务 i 的第 k 个可见时间窗口,其中 S_i^k 和 E_i^k 分别为可见时间窗口的开始和结束时间, $i \in J$ 。

d_i : 任务 i 的传输时间, $i \in J$ 。

t_m : 天线终端连续执行任务所需的切换时间, $m \in M$ 。

s_i : 任务 i 执行开始时刻。

e_i : 任务 i 执行结束时刻, $e_i = s_i + d_i$ 。

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

2.2 模型建立及约束条件

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & f_1 = \sum_{k \in \{1,2,\dots,n_i\}} \sum_{i \in J} x_i^k p_i \\
 \text{s. t.} \quad & 1) S_i^k \leq s_i \leq E_i^k - d_i, \text{ if } x_i^k = 1 \quad i \in J^s, \quad k \in \{1,2,\dots,n_i\}, \\
 & 2) \sum_{k \in \{1,2,\dots,n_i\}} x_i^k \leq 1 \quad \forall i \in J, \\
 & 3) s_j = s_i + d_i + t_m \text{ if } j \text{ after } i \quad \forall i, j \in J^s, m \in M, \\
 & 4) T_s \leq s_i \leq T_E, T_s \leq s_i + d_i \leq T_E, \quad i \in J^s.
 \end{aligned} \tag{1}$$

上述模型中,目标函数 f_1 中 x_i^k 为任务调度标识符, p_i 为对应任务 i 的优先级,所有任务的优先级与对应其调度标识的乘积之和为已调度任务的优先级权值之和。目标函数明确了调度的目标是保证系统完成尽可能多的高优先级任务。约束条件中,约束 1) 为时间窗口约束,表示任务 i 执行的开始时刻 s_i 和结束时刻 e_i 必须满足其第 k 个可见时间窗口的开始时间 S_i^k 和结束时间 E_i^k ,即任务执行必须在中继星与用户星的可见时间窗口内执行;约束 2) 为任务传输约束, x_i^k 为任务调度标识符, $x_i^k = 1$ 表示任务 i 可以在其第 k 个可见时间窗口内传输,表明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,即每个任务只执行一次;约束 3) 为切换时间约束,如果任务 i 和 j 连续在天线 m 上执行,且任务 j 在任务 i 之后执行,则任务 j 的传输开始时刻 s_j 必须在任务 i 的传输时间 d_i 及天线切换时间 t_m 之后,即同一天线上任何连续执行的任务必须满足切换时间约束;约束 4) 表示对于任务 i 的传输开始时刻 s_i 和结束时刻 $e_i = s_i + d_i$ 都应满足调度开始时间 T_s 及结束时间 T_E 的约束,即所有的通信任务必须在给定的调度周期 $[T_s, T_E]$ 内安排调度。

3 基于时间窗口更新和遗传算法的优化调度算法

3.1 遗传算法基本思想

遗传算法(GA)是一种进化算法,其基本原理是仿效生物界中的“物竞天择、适者生存”的演化法则。遗传算法中群体的每个个体代表问题的一个解,称为染色体,染色体的好坏用适应度值来衡量,根据适应度的好坏从上一代中选择一定数量的优秀个体,通过交叉、变异形成下一代群体,经过若干代的进化之后,算法收敛于最好的染色体,它即是问题的最优解或次优解。遗传算法适用于传统搜索算法难以解决的复杂和非线性优化问题,目前已被广泛应用于组合优化、人工智能等领域并取得了良好的成果^[11]。

3.2 适应度函数的计算

对于给定的染色体,适应度函数定义如下:

$$f = \sum_{k \in \{1,2,\dots,n_i\}} \sum_{i \in J} x_i^k p_i - \frac{T_c}{T_E}, \tag{2}$$

式中 x_i^k 为任务调度标识符, p_i 为对应任务 i 的优先级,所有任务的优先级与对应其调度标识的乘积之和定义为“优先级权值之和”。 T_c 为染色体中所有基因代表的通信任务完成调度的结束时刻, T_E 为调度时间段的结束时刻,两者的比值定义为“归一化完成时间”。适应度函数取“优先级权值之和”与“归一化完成时间”的差值,这说明已调度任务的优先级之和越大,则适应度函数越大;当已调度任务的优先级之和相等时,所有任务调度完成时间越短,则适应度函数越大,该染色体越优。

3.3 基于时间窗口更新的循环迭代算法

用户星上一共发起 N 个任务,每个任务具有优先级,所有的任务按优先级由大到小的顺序进行排序,对于优先级相同的任务,根据任务持续时间由小到大排序。依据任务所使用的天线资源的类别,可以把任务分为不同的集合。对于使用同一天线资源的任务集合,依次按任务在集合中的顺序进行调度。

完成一个任务的调度包括两个过程:调度时间的确定和后续任务可见时间窗口的更新。设当前调度的任务为第 i 个任务,对其进行调度,首先判断是否存在可见时间窗口可用;如果 $d_i \leq E_i^k - S_i^k$,说明任务 i 可以在其第 k 个可见时间窗口进行调度,确定任务执行的开始时间为 $s_i = S_i^k$,任务执行的结束时刻为 $e_i = s_i + d_i$,记 $x_i^k = 1$,并更新后续任务的可见时间窗口。时间窗口的更新根据任务间不同的影响而采取不同的更新方式,当前调度的任务 i 对后续任务 j 的可见时间窗口的影响存在以下 5 种情况:前交叉、后交叉、包含、覆盖、

无关,依次如图 1(a)~(e)所示。

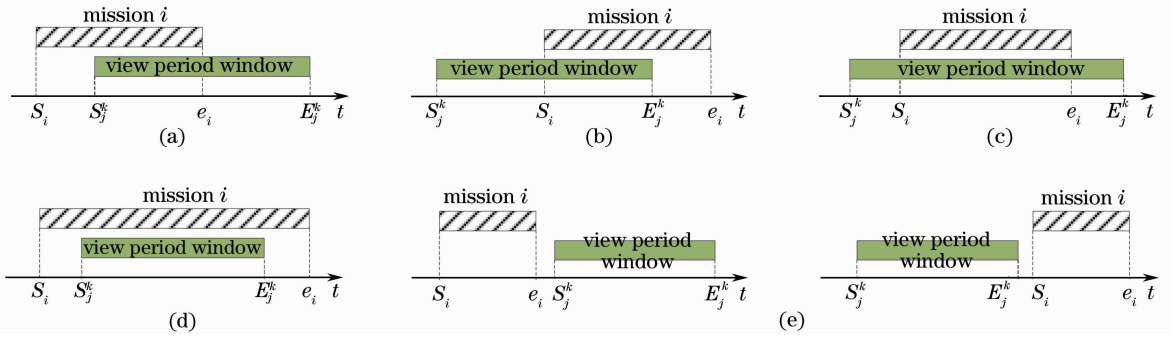


图 1 已调度任务与可见时间窗口之间的时序关系图

Fig. 1 Relationship between scheduling-mission and view period window

时间窗口更新情况分别如下。

- 1) 如果 $s_i \leq S_j^k$ & $S_j^k < e_i < E_j^k$, 说明当前任务 i 与任务 j 的第 k 个可见时间窗口前交叉, 原可见时间窗口 $[S_j^k, E_j^k]$ 更新为 $[e_i, E_j^k]$ 。
- 2) 如果 $e_i \geq E_j^k$ & $S_j^k < s_i < E_j^k$, 说明当前任务 i 与任务 j 的第 k 个可见时间窗口后交叉, 原可见时间窗口 $[S_j^k, E_j^k]$ 更新为 $[S_j^k, s_i]$ 。
- 3) 如果 $s_i > S_j^k$ & $e_i < E_j^k$, 说明当前任务 i 包含于任务 j 的第 k 个可见时间窗口内, 原可见时间窗口 $[S_j^k, E_j^k]$ 更新为 2 个可见时间窗口 $[S_j^k, s_i]$ 和 $[e_i, E_j^k]$, 同时将任务 j 的可见时间窗口数加 1。
- 4) 如果 $s_i \leq S_j^k$ & $e_i \geq E_j^k$, 说明当前任务 i 对任务 j 的第 k 个可见时间窗口完全覆盖, 原可见时间窗口 $[S_j^k, E_j^k]$ 更新为不可用, 在可见时间窗口列表中删除该窗口, 同时将任务 j 的可见时间窗口数减 1。
- 5) 如果 $e_i < S_j^k$ || $s_i > E_j^k$, 说明当前任务 i 与任务 j 的第 k 个可见时间窗口之间无冲突, 可见时间窗口 $[S_j^k, E_j^k]$ 保持不变。

每次完成对当前任务的调度后进行后续任务的可见时间窗口更新, 再将下一个任务设为当前任务, 循环进行可见时间窗口更新, 完成任务的调度。

3.4 调度流程

基于时间窗口更新的循环迭代算法在任务调度中, 首先进行调度前期准备工作: 对于用户星上发起的任务依据优先级以及任务持续时间进行排序, 再依据任务所使用的不同天线资源把任务分为不同的集合。对于使用同一天线资源的任务集合, 依次按任务在集合中的顺序进行调度, 其具体调度流程如图 2 所示。

由流程图可知: 完成一个任务的调度包括“当前任务调度时间的确定”和“后续任务可见时间窗口的更新”两个操作。“当前任务调度时间的确定”操作的主要过程是: 判断是否存在可见时间窗口调度当前任务, 若遍历所有时间窗口仍无法调度当前任务, 则将当前调度任务加入未调度队列 US。“后续任务可见时间窗口的更新”两个操作的主要过程是: 依次对所有后续任务的所有可见时间窗口按照图 1 中的 5 种影响情况进行更新。

3.5 算法步骤

- 1) 确定各种约束条件, 建立中继卫星调度问题的约束规划模型。采用天线资源表示方法, 即染色体上每个基因代表该任务调度所选择的的天线资源序号, 对通信任务调度序列对应的染色体进行编码。
- 2) 随机选择两个染色体, 作为下一步操作的两个父个体。
- 2) “交叉”: 采用顺序交叉算子对两个父个体进行交叉操作, 得到两个子个体, 即不同调度方案进行相互融合, 以确保较好调度方案的遗传性。
- 4) “变异”: 采用交换变异算子对两个子个体进行变异操作, 得到两个新的子个体, 即对生成的调度方案进行微调, 以增加调度方案的多样性。
- 5) “选择”: 根据(2)式计算新个体的适应度值, 并与两个父个体进行比较, 选择适应度值最大的两个个体作为进行下一次遗传操作的父个体。

6) 若迭代次数已达到最大值,算法结束,选择此时种群中最优个体作为最优调度方案。否则,转 3)。

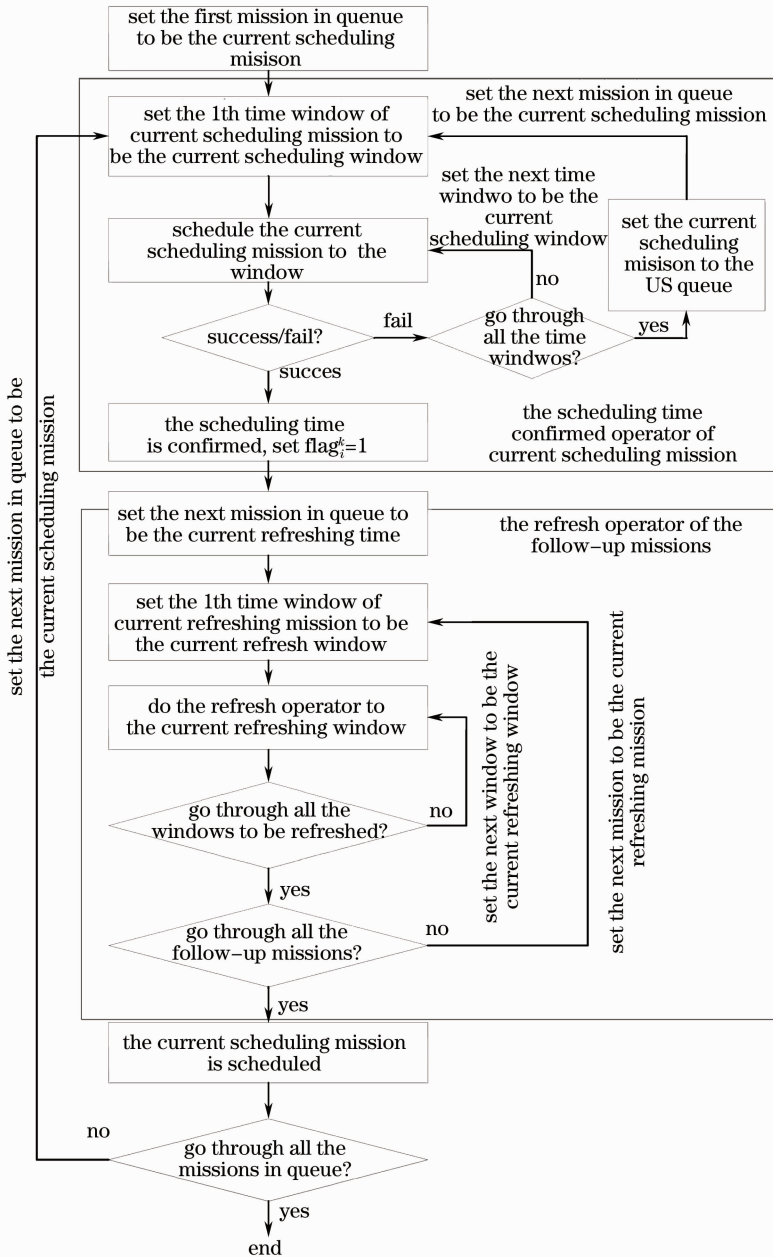


图 2 同一资源上任务的调度流程

Fig. 2 Scheduling process of mission on the same recourse

4 仿真及结果分析

4.1 仿真场景

国际上许多航天及天文机构都提供目前在轨运行卫星的轨道参数,本文所采用的轨道数据来源于美国 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,中继卫星上设有 3 个光学终端,终端平均切换时间为 100 s。仿真时段为 00:00:00~12:00:00,用户卫星从卫星工具箱(STK)导入,其数据如表 1 所示。

利用 STK 对用户星进行可见性分析,可得中继卫星与用户星间的可见时间窗口如表 2 所示。

设每个用户卫星发起 8 个任务,一共 32 个任务需要进行调度,每个任务具有不同优先级,任务的传输时间及优先级权值如表 3 所示。

表 1 用户星基本情况

Table 1 Basic situations of user satellites

Satellite	LEO 01	LEO 02	LEO 02	LEO 03
Altitude /km	400	1000	2000	3000
Orbit inclination angle /($^{\circ}$)	35	95	115	115

表 2 中继卫星和用户星之间可见时间窗口

Table 2 Time windows between relay satellite and user satellites

Satellite (altitude)	LEO 01 (400 km)		LEO 02 (1000 km)		LEO 03 (2000 km)		LEO 04 (3000 km)	
Time window	00:00:00	00:48:25	00:02:56	01:09:15	00:00:00	01:06:04	00:00:00	01:37:23
	01:31:04	02:26:00	01:48:34	02:53:41	01:45:10	03:08:38	02:18:25	04:03:15
	03:08:40	04:03:47	03:32:42	04:39:43	03:46:45	05:13:47	04:38:07	10:44:25
	04:46:25	05:42:26	05:14:26	06:32:44	05:42:02	10:50:29	11:09:07	12:00:00
	06:25:02	07:22:17	06:44:14	10:52:47	11:20:48	12:00:00		
	08:04:54	09:02:36	11:26:22	12:00:00				
	09:45:12	10:42:00						
	11:24:36	12:00:00						

表 3 用户星发起任务列表

Table 3 Mission list in user satellite

Mission	Processing time /s	PRI	Mission	Processing time /s	PRI	Mission	Processing time /s	PRI	Mission	Processing time /s	PRI
J ₁	1385	4	J ₉	3049	10	J ₁₇	911	1	J ₂₅	1321	2
J ₂	3767	3	J ₁₀	995	4	J ₁₈	2722	4	J ₂₆	3520	5
J ₃	2115	5	J ₁₁	5283	3	J ₁₉	3014	2	J ₂₇	4215	2
J ₄	1245	4	J ₁₂	6103	3	J ₂₀	2583	5	J ₂₈	2892	3
J ₅	2965	2	J ₁₃	2360	3	J ₂₁	3047	2	J ₂₉	3451	2
J ₆	2578	5	J ₁₄	14520	4	J ₂₂	4252	3	J ₃₀	3940	5
J ₇	4926	2	J ₁₅	3707	4	J ₂₃	4983	1	J ₃₁	923	2
J ₈	5562	10	J ₁₆	3749	3	J ₂₄	12580	4	J ₃₂	894	3

4.2 结果分析

利用基于时间窗口更新的遗传算法(种群数目为 30,迭代次数为 50,变异概率为 0.5)对任务进行调度,算法搜索得到的全部任务完成的时间为 12.3367 s,算法搜索过程如图 3 和图 4 所示,得到的最优调度结果如图 5 所示。

图 3 显示各代最优个体适应度值的记录,由记录结果可以看出,适应度值在收敛过程中出现了三次差值较大的阶跃,表明遗传算法搜索过程中找到了“优先级权值之和”更大的调度结果。另外需要注意的是从第 18 代到第 27 代的收敛过程中,适应度值出现多次差值小于 0.01 的攀升,这是由于适应度函数的定义所产

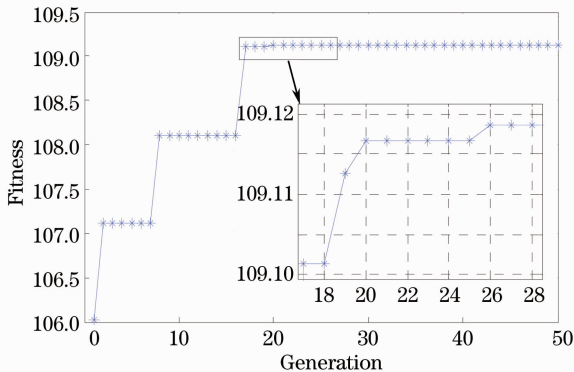


图 3 各代最优个体适应度值的记录

Fig. 3 Best fitness value in each generation

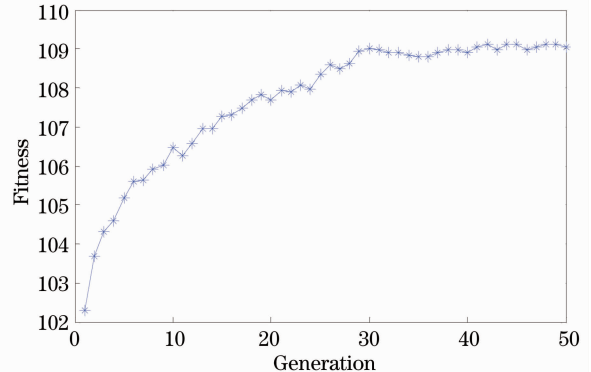


图 4 各代群体平均适应度值的记录

Fig. 4 Average fitness value in each generation

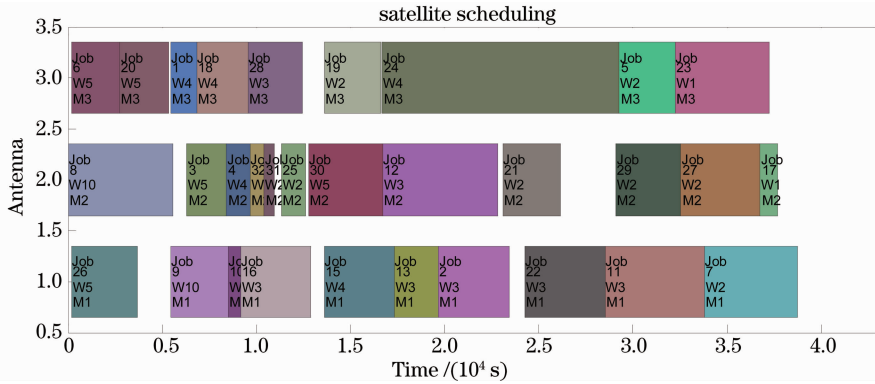


图5 所有任务调度结果甘特图

Fig. 5 Gantt chart of scheduling result

生的结果。(2)式中适应度函数定义为“优先级权值之和”与“归一化完成时间”的差值,“优先级权值之和”为整数,“归一化完成时间”为小于1的小数,由于适应度函数是由二者共同决定的,在第18代至第27代的适应度值出现多次攀升表明算法在获得多种“优先级权值之和”相等的调度方案后进一步追求“更早完成”的方案,表明算法对调度方案的优化更全面。图4显示了各代染色体平均适应度值的记录,表明算法搜索到30代左右种群整体基本达到最优值附近,算法已基本收敛。

图5中显示了3个光学终端上任务调度的具体时间及调度顺序,不同的色块代表不同任务,色块长度代表任务大小,色块上的标签分别表示任务号、任务相应的优先级和所使用的天线资源序号。在本次调度中,调度时间周期为43200 s(12 h),全部调度执行完成时间为38280 s,任务完成率为93.75%,获得调度任务优先级权值之和为107,占总优先级权值的90%以上。因为资源冲突,任务14和任务30未能安排调度,其优先级权值分别为4和5。考虑到任务必须在特定的时间窗口内安排调度,本次调度的结果是比较令人满意的。

5 结 论

高效的数据中继卫星资源调度是天基综合信息网建设的一项关键技术。本文针对激光链路中继卫星资源调度问题,分析了激光链路资源调度的特点,建立了约束规划模型,提出了一种基于时间窗口更新的中继卫星资源调度算法。算法对不同资源的任务集合进行调度安排并实现了可见时间窗口的动态更新,获得调度任务的总优先级权值并将其作为参量计算适应度值,最后通过遗传算法对不同调度方案进行寻优,获得最优调度结果。仿真结果表明该算法在保证结果的优化性同时能够较快收敛,同时考虑与人工智能算法结合可以提高优化效果,获得更优解,适用于多任务、多天线的中继卫星资源调度场景。

参 考 文 献

- 1 Ma Manhao, Qiu Dishan, Wang Liang. Modeling topology structure of space-based information system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 606–610.
马满好, 邱涤珊, 王亮. 天基信息系统网络拓扑结构建模方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(5): 606–610.
- 2 Sheng Weidong, Long Yunli, Zhou Yiyu. Analysis of target location accuracy in space-based optical-sensor network [J]. Acta Optical Sinica, 2011, 31(2): 0228001.
盛卫东, 龙云利, 周一宇. 天基光学传感器网络目标定位精度分析[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0228001.
- 3 Wang Jiasheng. Proposal for developing China's data relay satellite system [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(2): 1–8.
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.
- 4 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.
- 5 Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, *et al.*. Laser communication terminals for the european data relay system [C].

- SPIE, 2012, 8246; 82460D.
- 6 Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092801.
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092801.
- 7 Yan Aimin, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 040601.
闫爱民, 周煜, 孙建锋, 等. 卫星激光通信复合轴光跟瞄技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(4): 040601.
- 8 Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 3-20.
刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 3-20.
- 9 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.
- 10 Toni Tolker Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- 11 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun. A survey on scheduling for TDRS [J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(11): 1767-1773.
赵静, 赵尚弘, 李勇军. 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): 1767-1773.
- 12 S Rojanasoonthon, J Bard. A grasp for parallel machine scheduling with time windows [J]. *J Computing*, 2005, 17(1): 32-51.
- 13 Harry C Shaw, Michael W Rackley, Y F Wong, *et al.*. TDRSS space ground link terminal user services subsystem replacement and upgrades [C]. *Proc of SpaceOps*, 2010. AIAA 2010-2084.
- 14 Fang Yanshen, Chen Yingwu, Gu Zhongshun. CSP model of the relay satellite scheduling [J]. *J National University of Defense Technology*, 2005, 27(2): 6-10.
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.
- 15 Chen Lijiang, Wu Xiaoyue, Li Yunfeng. Scheduling algorithm for relaying satellite based on temporal flex ability [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2007, 36(4): 48-51.
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*, 2007, 36(4): 48-51.