

微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度算法

赵 静 赵卫虎 李勇军 赵尚弘 韩 磊 李 轩

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要 针对未来数据中继卫星系统中微波与激光链路并存的发展趋势,研究了微波/光混合链路的中继卫星系统资源调度问题。分析了混合链路在传输速率、链路建立及终端功耗等方面的特点,以多时间窗口、多种类型天线以及任务优先级为参量,以未调度任务总权重、终端总功耗及调度完成时间为目标,建立多目标约束规划模型;提出基于模型分解的优化求解算法,将模型分解为任务调度子问题和优化求解子问题,任务调度子问题通过基于时间窗口更新的调度方法获得初始调度方案,优化求解子问题利用遗传算法对方案进行优化,获得最优调度结果;仿真结果中任务完成率为 93.75%,调度任务的权值之和占总权值的 96.96%。结果验证了该方法在描述求解具有多任务、多类型天线的微波/光混合链路中继卫星系统资源调度中的有效性。

关键词 光通信; 中继卫星; 微波/光混合链路; 资源调度; 多目标优化; 时间窗口更新

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1005005

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

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

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

Abstract According to the developing trend for the combination of microwave and laser links in the future data relay satellite system, the scheduling problem for data relay satellite with microwave/laser hybrid links is studied. Microwave and laser hybrid links are analyzed in data rate, links establishment and power consumption. With the multi-window, multi-antenna and mission priority as parameters, and the gross weight of un-scheduling missions, the gross power consumption and the scheduling-time as object functions, the multi-objective scheduling model is formulated. The model is decomposed into a task assignment sub-problem and a scheduling optimizing sub-problem. In the task assignment phase, the mission is scheduled with time window update, and in the scheduling optimizing phase, the scheduling project is optimized by genetic algorithm. The simulation result shows that the mission completion rate is 93.75% and the sum of mission weights is 96.96%. the simulation result reveals that the model and algorithm are suitable in multi-mission and multi-antenna microwave/laser hybrid links data relay satellite scheduling problem.

Key words optical communications; data relay satellite; microwave/laser hybrid links; resource scheduling; multi-objective optimization; time window update

OCIS codes 200.2605; 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^[1-4]。增加数据中继卫星传输容量成为下一步数据中继系

统迫切发展的主题,而星间激光链路正是针对目前微波链路数据中继能力相对不足所提出的解决方案。近几年,以欧洲为代表的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

收稿日期: 2013-04-25; 收到修改稿日期: 2013-05-31

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: panpasi126@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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

和星上演示验证,并启动了相应的工程验证计划^[5-11]。在具有微波/光混合链路的数据中继卫星系统中,中继星通过激光链路构成数据中继骨干网,同时为用户星提供多条激光和微波链路。随着卫星激光链路通信的不断发展和多星组网的趋势,解决中继卫星资源的优化调度问题日益迫切。

目前关于卫星资源调度问题的研究都只针对微波链路且主要集中在对地观测卫星领域,文献[12]利用动态聚类调度算法和模拟退化算法解决了多星多圈次的观测调度问题。文献[13]基于时间序有向图对观测卫星调度问题进行研究。文献[14]针对对地观测系统中的数传调度技术提出了一种基于吱呀优化的多卫星数传调度算法。文献[15]对具有复杂约束的对地观测卫星调度问题建立无环路有向图模型并基于标记更新最短路径算法进行求解。中继卫星资源调度方面能够检索到的文献比较少,文献[16]采用并行机调度理论对中继卫星调度问题进行研究,建立了混合整数规划模型,考虑了任务的优先级(PRI),采用贪婪随机自适应搜索算法对模型进行求解并获得较优结果,但仅研究了不多于两个时间窗口的调度问题。文献[17]提出了一种基于任务时间灵活度的中继卫星调度算法,最后运用该算法对一个调度算例进行了验证求解,但仅得到调度初始方案,未对调度方案进行进一步优化。文献[18-19]

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,算法全面考虑各类约束,因此计算开销较大。

基于此,本文对微波/光混合链路中继卫星系统资源调度问题进行了研究,建立了微波/光混合链路的数据中继卫星系统的资源调度多目标约束规划模型;提出了基于模型分解的优化求解算法,给出了一个仿真场景对本文模型及算法进行仿真验证,仿真结果表明本文模型及算法能够有效解决具有多任务、多天线的微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度问题。

2 微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度特点

未来基于微波/光混合链路的数据中继系统如图1所示,星间采用激光链路充分发挥激光在太空的极大带宽优势和良好的传输特性,星地主要采用微波链路充分利用其成熟的地面站技术,避免了大气对激光的影响,同时为了突破星地接入的带宽和容量限制,积极发展装有光学自适应系统的光学地面站,通过地球同步轨道卫星(GEO)-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。

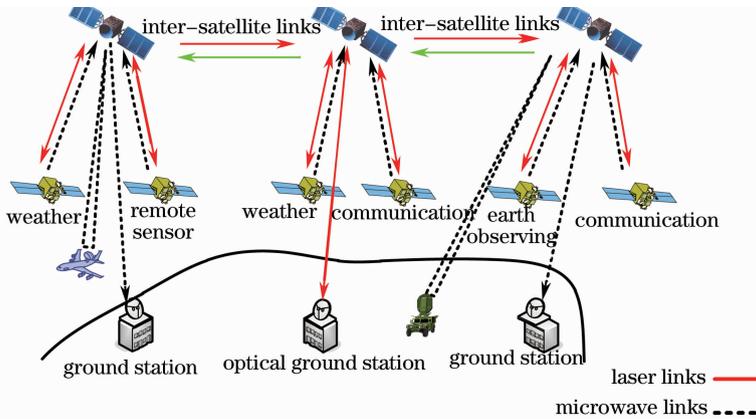


图1 微波/激光链路融合的数据中继系统

Fig.1 Microwave/laser links data relay satellite system

在微波与激光链路共存的数据中继卫星系统中,卫星的资源调度问题具有以下特点:

1) 中继卫星资源调度具有可见时间窗口约束,可见时间窗口是卫星调度中的一个重要约束条件。可见时间窗口是中继卫星与用户星之间可通行的时间段的集合,是指在某时刻,用户星与中继卫星之间的连线与地球没有交点即两者可视。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。

2) 中继卫星资源调度具有任务优先级约束。中继卫星服务的用户星不同,就会有不同的任务需要中继,不同任务的优先级不同,任务的优先级越高,其活动越需要优先安排。

3) 由于激光载波频率高,星上激光链路实时

理传输能力在 Gb/s 量级。对于一定的数据传输任务,选择不同的天线资源可获得不同的星间传输速率,选择光学天线资源进行任务传输,相对与传统的微波天线资源,任务传输所需的时间将大大缩短。因此在调度预处理阶段,需要根据传输任务容量以及任务选择的天线资源分别计算任务的传输时间,再根据任务传输时间、终端切换时间与卫星可见时间窗口之间的关系进行调度方案的制定。

4) 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^[20]。在具有混合链路的数据中继卫星系统资源调度中,必须要考虑激光终端切换时间(包括资源准备时间和链路建立时间)对于调度方案的影响,对基于可见时间窗口的调度方法进行合理改进,以实现微波与激光链路的混合调度。

5) 光学天线尺寸小,终端功耗和重量也大大降

低,非常适合星载。一般卫星光通信天线孔径小于 30 cm,功耗和质量分别约为 100 W 和 30 kg。在卫星通信实际应用中,进行资源调度方案的评价时除考虑任务完成效率、任务完成收益外,还应将星上终端资源消耗作为评价因素之一。

3 多目标约束规划模型

由上述对基于微波/光混合链路的中继卫星资源调度特点分析可知,混合链路的中继卫星资源调度问题受到可见时间窗口、任务优先级、资源功耗等约束,可以看作一类多目标 CSP。CSP 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 CSP。一个 CSP 由一个变量集合、每个变量的值域以及一个限制变量取值的约束的集合组成,其任务就是在各变量的值域范围内,为所有的变量找到一个赋值,尽可能使所有的约束得到满足。

约束规划模型表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1 = \sum_{i \in J} x_i p_i; \\ \min f_2 = \sum_{l \in M} [P_l \sum_{i \in J} (d_i^l + t_l)]; \\ \min f_3 = T_e; \\ \text{s. t. } 1) S_i^k \leq s_i \leq E_i^k - d_i^l - t_l, \text{ if } x_i = 1, \\ \quad W_i = \bigcup_{k=1}^{n_i} [S_i^k, E_i^k], i \in J, l \in M, k \in \{1, 2, \dots, n_i\}; \\ 2) T_s \leq s_i \leq T_e, T_s \leq e_i + t_l \leq T_e, e_i = s_i + d_i^l, i \in J, l \in M. \end{array} \right. \quad (1)$$

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小,即完成尽可能多的高优先级任务。其中 x_i 为任务调度标识符, $x_i \in \{0, 1\}$, $x_i = 0$ 或 $x_i = 1$ 表示通信任务 i 被安排调度或未被安排调度; p_i 为任务优先级, $p_i \in \{1, 2, \dots, 10\}$; $i \in J$, J 为通信任务集合。目标函数 f_2 代表调度的目标是保证系统资源消耗最小。其中 P_l 为天线资源 l 的平均功耗; d_i^l 为任务 i 在第 l 个天线上的传输时间; t_l 代表天线资源 l 的切换时间; $l \in M$, M 为天线资源集合。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,其中 T_e 为所有任务完成调度的结束时刻。

约束条件 s. t. 中,约束 1) 为时间窗口约束,表示任务 i 必须在其第 k 个可见时间窗口 $[S_i^k, E_i^k]$ 内执行完毕。其中 s_i 为任务执行开始时刻; W_i 为时间窗口集合, S_i^k 表示任务 i 的第 k 个可见时间窗口的开

始时刻, E_i^k 表示任务 i 的第 k 个可见时间窗口的结束时刻, $k \in \{1, 2, \dots, n_i\}$, n_i 为任务 i 的时间窗口数; 一个任务在其所有可见时间窗口中仅选取一个时间窗口进行传输。约束 2) 为调度时间约束,表示所有的通信任务 i 必须在给定的调度时间段 $[T_s, T_e]$ 内安排调度。 s_i 为任务执行开始时刻, e_i 为任务执行结束时刻, T_s 表示调度时间段的开始时刻, T_e 表示调度时间段的结束时刻。

在基于微波/光混合链路的中继卫星系统资源调度问题中优先级总和、资源消耗和时间是不同量纲的目标参数,为了得到优化的调度结果,首先对目标参数进行无量纲的标准化处理,再根据基于模糊偏好对优化目标分别确定加权系数,最后利用线性加权法,在对各个目标函数进行分析的基础上,通过多个目标函数加权运算来构造单目标函数,将多目标问题转化为单目标的优化问题。具体表达为

$$\min f = \sum_{i=1}^k \omega_i f_i, \quad (2)$$

式中 ω_i 为权重,一般取 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$; f_i 为目标函数 (其中 $i = 1, 2, \dots, k$); k 为目标函数个数。

1) 目标参量的无量纲标准化处理:

无量纲标准化处理^[21]公式为

$$a_{pq} = \frac{99 \times [c_{pq} - \min_p(c_{pq})]}{\max_p(c_{pq}) - \min_p(c_{pq})} + 1, \quad (3)$$

式中 a_{pq} 代表经过无量纲标准化处理的第 p 个方案的第 q 个目标参量指标值, c_{pq} 代表原始目标参数指标值, $\max_p(c_{pq})$ 代表目标参量在 p 个方案中的最大值, $\min_p(c_{pq})$ 代表目标参量在 p 个方案中的最小值。

2) 基于偏好关系的权值确定:

本文研究调度问题有 3 个目标函数, $F = \{f_1, f_2, f_3\}$, 构造等价类: $C_1 = \{f_1\}, C_2 = \{f_2\}, C_3 = \{f_3\}$. $C = \{c_1, c_2, c_3\}$, 其中 $c_i \in C_i, 1 \leq i \leq 3$. 偏好关系为: $c_2 \ll c_1, c_3 \ll c_1, c_3 < c_2$, 根据偏好关系计算^[22] 得到目标函数的规范化权值为: $\omega(f_1) = 0.54, \omega(f_2) = 0.33, \omega(f_3) = 0.13$ 。

4 基于时间窗口更新的优化调度算法

中继卫星资源调度问题是一个复杂的组合优化问题,被证明为非确定性多项式-难问题(NP-hard)问题,解空间随任务与资源增加指数增加。另一方面,与传统的组合优化问题不同,中继卫星资源调度问题具有特有的可见时间窗口约束,中继星与用户星之间的数据传输只有在二者具有可见时间窗口时才能进行。鉴于问题的复杂性,提出了基于模型分解的求解思路,把问题分为任务调度子问题和优化求解子问题,采用遗传算法和启发式算法相结合的优化调度算法进行求解,启发式算法利用问题相关的启发式信息,判断任务是否能够在卫星当前可见时间窗口内传输,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”两个步骤,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,基于时间窗口更新的优化调度算法流程如图 2 所示。

4.1 任务调度子问题

可见时间窗口是中继卫星调度中的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。只有可见时间窗口大小足以传输任务时才能成功安排调度,具体算法如下:

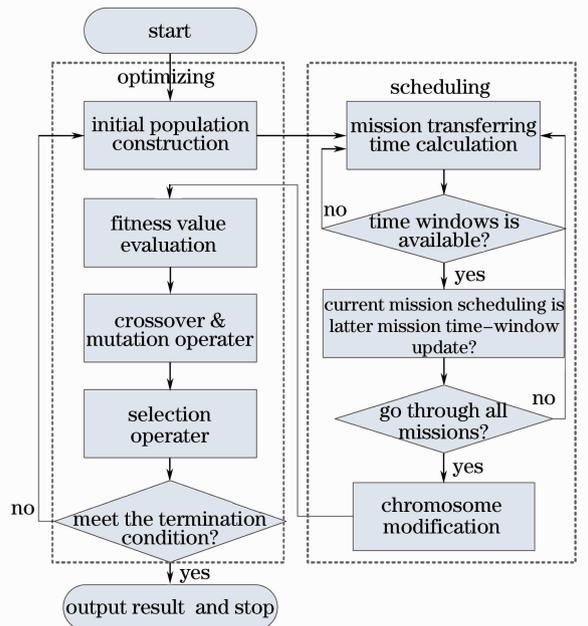


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

- 1) 初始化任务的资源调度方案序列。
- 2) 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。
- 3) 在任务集合中读取要调度的任务,查找当前调度任务的所有可见时间窗口。
- 4) 在可见时间窗口集合中读取时间窗口。
- 5) 判断当前时间窗口是否可用,如果当前时间窗口可以传输当前任务,则安排调度任务,并确定任务调度的开始时间和结束时间,转入 6),否则时间窗口序号加 1 返回 4)。
- 6) 判断当前调度任务的调度时间与集合中后续任务的可见时间窗口是否冲突,如果发生冲突则更新可见时间窗口,否则当前任务调度结束。
- 7) 任务序号加 1 返回 3),直到集合中所有任务完成调度。
- 8) 结束循环,生成调度序列和未完成调度任务集合。

4.2 优化求解子问题

4.2.1 编码基本思想

选择一种合适的染色体表现型是应用遗传算法寻优的第一步。考虑基于任务优先级的资源调度方案,选择天线资源表示方法,即染色体上每个基因代表该任务调度所选择的天线资源序号。编码过程:获取用户星上的初始任务序列,每个任务具有优先级;将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;对通信任务调度序列对应的染色体进行编码,随机产生初始种群。

4.2.2 适应度函数的计算

对于给定的染色体,适应度函数定义为

$$f^s = \sum_{i=1}^k f_i^s \omega_i, \quad (4)$$

式中 k 为目标函数个数, f_i^s 为目标函数 i 的无量纲标准化指标值, ω_i 为目标函数 i 的权重。适应度函数取 3 个目标参数的线性加权和,这说明未完成调度任务的优先级之和越小,天线资源所损耗的能量越少,所有任务调度完成时间越短,则适应度函数越小,该染色体越优。

4.2.3 交叉、变异算子

在执行交叉操作前,确定进行交叉操作的父代种群,采取两两分组配对的方式进行交叉,随机产生交叉位置,对交叉点前后两部分数据进行交叉,两个父代种群交叉产生两个新子代种群,然后进行择优操作。变异操作可以帮助收敛过程跳出局部最优点,增加种群的多样性。本文采取逆序操作(INV)变异算子,随机交换染色体中两个不同基因的位置。

4.2.4 选择算子

选择操作能够使高性能的个体以更大的概率生存,从而提高全局的收敛性和计算效率。选择两两随机配对竞争的方式,通过随机设置对比个体对,比较个体的适应度值,进行择优选择,具有保留最优个体的能力。

5 仿真及结果分析

5.1 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,中继卫星上设有 3 个单址天线,天线类型分别为 S 波段、Ku 波段和光学天线,根据欧空局的欧洲数据中继卫星(EDRS)^[11]中激光链路性能参数,设定终端具体参数如表 1 所示。仿真时段为 00:00:00~06:00:00,用户卫星从卫星工具包(STK)导入,其数据见表 2。

表 1 天线终端参数

Table 1 Parameters of the antennas

Antenna	S	Ku	Optical
Data rate / (Mb/s)	10	200	1.8
Power consumption / W	500	500	100

表 2 用户星基本情况

Table 2 Basic situation of user satellites

Satellite	LEO 01	LEO 02	LEO 03	LEO 04
Altitude / km	400	1000	2000	3000
Orbit inclination angle / ($^\circ$)	35	95	115	115

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 3 所示。

表 3 中继卫星和用户星之间可见时间窗口

Table 3 Time windows between relay satellite and user satellites

Satellite	LEO 01	LEO 02	LEO 03	LEO 04
Altitude / km	400	1000	2000	3000
Time window	00:00:00 00:48:25 01:31:04 02:26:00 03:08:40 04:03:47 04:46:25 05:42:26	00:02:56 01:09:15 01:48:34 02:53:41 03:32:42 04:39:42 05:14:26 06:00:00	00:00:00 01:06:04 01:45:10 03:08:38 03:46:45 05:13:47 05:42:02 06:00:00	00:00:00 00:07:07 00:45:04 02:49:09 03:30:14 05:44:53 05:54:58 06:00:00

设每个用户卫星发起 16 个任务,一共 64 个任务需要进行调度,每个任务具有不同优先级,任务优先级为 $[0, 10]$ 内的均匀随机数。任务的传输时间及优先级权值如表 4 所示。

表 4 用户星发起任务列表

Table 4 Mission list in user satellites

Job	Capacity / Gb	PRI	Job	Capacity / Gb	PRI	Job	Capacity / Gb	PRI	Job	Capacity / Gb	PRI	Job	Capacity / Gb	PRI
J ₁	5021	4	J ₁₄	384	2	J ₂₇	823	10	J ₄₀	852	3	J ₅₃	25.3	1
J ₂	556	2	J ₁₅	40.6	5	J ₂₈	892	1	J ₄₁	1854	9	J ₅₄	121	4
J ₃	1258	8	J ₁₆	568	2	J ₂₉	453	10	J ₄₂	394	4	J ₅₅	458	4
J ₄	995	3	J ₁₇	3117	5	J ₃₀	30	5	J ₄₃	592	1	J ₅₆	746	2
J ₅	800	2	J ₁₈	42	10	J ₃₁	423	2	J ₄₄	25	4	J ₅₇	421	9
J ₆	2351	5	J ₁₉	429	4	J ₃₂	845	1	J ₄₅	279	3	J ₅₈	332	2
J ₇	998	4	J ₂₀	1035	2	J ₃₃	84.2	4	J ₄₆	321	8	J ₅₉	129	3

Job	Capacity /Gb	PRI	Job	Capacity Gb	PRI									
J ₈	2068	3	J ₂₁	432	4	J ₃₄	112	2	J ₄₇	705	5	J ₆₀	294	4
J ₉	406	5	J ₂₂	786	4	J ₃₅	50	5	J ₄₈	4931	3	J ₆₁	14	7
J ₁₀	3431	1	J ₂₃	366	1	J ₃₆	321	6	J ₄₉	9.1	5	J ₆₂	531	4
J ₁₁	1431	4	J ₂₄	384	2	J ₃₇	2013	2	J ₅₀	154	1	J ₆₃	1230	2
J ₁₂	324	2	J ₂₅	206	3	J ₃₈	6938	3	J ₅₁	123	4	J ₆₄	211	3
J ₁₃	382	3	J ₂₆	510	10	J ₃₉	831	2	J ₅₂	2995	3			

5.2 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 60,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 66.1043 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值的记录,由记录结果可以看出,适应度值在收敛过程中的出现连续差值较小的下降,表明遗传算法搜索过程中有效搜索具有更优适应度值的调度结果。这是由于适应度

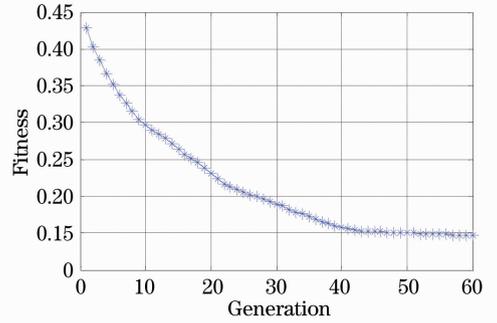


图 4 各代群体平均适应度值的记录

Fig. 4 Average fitness values in each generation

函数的定义所产生的。(4)式中适应度函数定义为 3 个目标参数的加权和,由于适应度函数是由三者共同决定的,其适应度值变化具有连续性表明该算法是一种追求“更优”的方案,算法对调度方案的优化更全面。图 4 显示各代染色体平均适应度值的记录,表明算法搜索到 55 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 个天线资源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,色块长度代表任务传输时间长短,色块上的标签 J 表示任

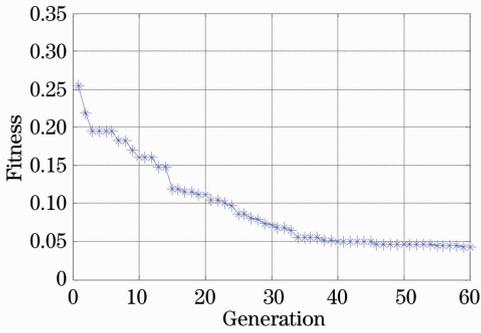


图 3 各代最优个体适应度值的记录

Fig. 3 Best fitness values in each generation

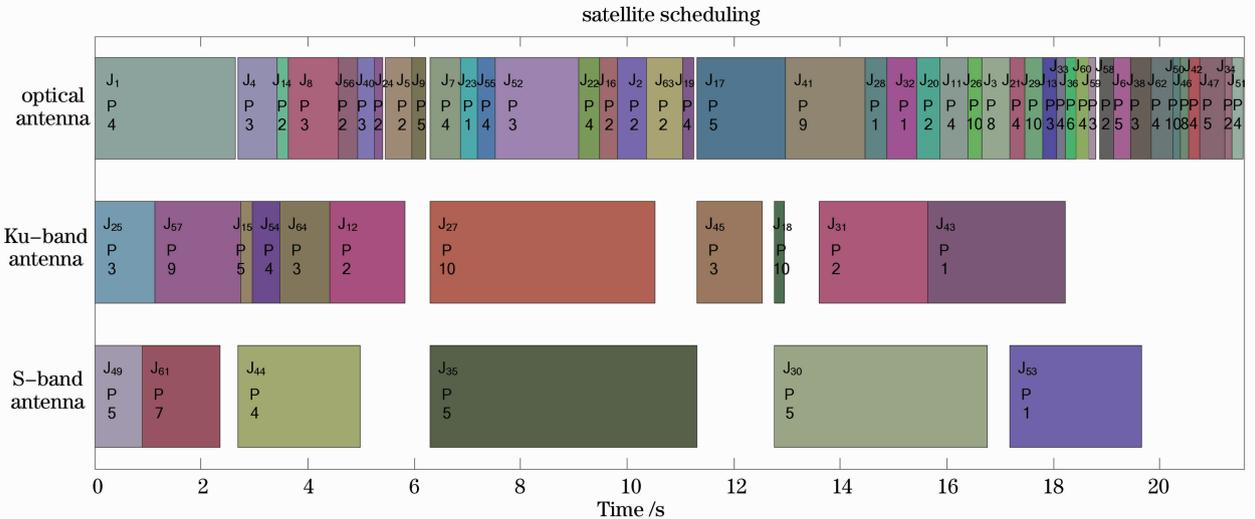


图 5 所有任务调度结果甘特图

Fig. 5 Gantt chat of scheduling results

务序号, P 表示任务优先级。由图中可以看出, 由于激光链路传输速率高, 中继传输能力强, 根据模型调度方案优先采用光学天线对大容量任务进行安排, 激光链路能以高速率快速完成任务中继传输, 并且整体天线功耗较低, 因此光学天线上传输任务量较多, 天线利用率较高; S 和 Ku 波段微波链路和激光链路相比传输速率低、功耗大, 当激光链路无法满足任务调度需求时, 采用微波天线进行调度安排, 而微波链路中继传输能力有限, 因此所安排调度任务量较少。在本次调度中, 调度时间周期为 21600 s (6 h), 全部调度执行完成时间为 21569.586 s, 任务完成率为 93.75%, 调度任务的权值之和占总任务权值的 96.96%, 未调度任务的总权值之和仅占总任务权值的 3.04%。因为资源冲突, 任务 48、37、39 和任务 10 未能安排调度, 其优先级权值分别为 3、2、2 和 1。考虑到任务必须在特定的时间窗口内安排调度, 本次调度结果表明本文调度算法在收敛速度、调度效率方面具有优势, 适应于多任务、多天线的微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度。

6 结 论

未来高效可靠的数据中继卫星系统资源调度是天基综合信息网建设的一项关键技术。研究了微波链路和激光链路在资源调度中的区别, 建立了基于微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度多目标约束规划模型, 提出了一种基于时间窗口更新的中继卫星资源调度算法, 通过调度算法获得初始方案, 再利用遗传算法对不同调度方案进行寻优, 获得最优调度结果。仿真结果表明该模型适用于描述具有多任务、多类型天线的微波与激光混合链路的中继卫星资源调度, 算法在保证结果优化性的同时能够较快收敛。下一步研究考虑调度算法与其他人工智能算法结合提高优化效果, 以期获得更优解。

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, 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 Optica 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 J Teles, M V Samii, C E Doll. Overview of TDRSS[C]. Adv Space Res, 1995, 16(12): 67-76.

- 4 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.
- 5 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.
- 6 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 焯, 孙建锋, 等. 卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 040601.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, et al.. Laser communication terminals for the European data relay system[C]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- 12 Wu Guohua, Ma Manhao, Wang Huilin, et al.. Multi-satellite observation scheduling based on task clustering [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1275-1282.
伍国华, 马满好, 王慧林, 等. 基于任务聚类的多星观测调度方法[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1275-1282.
- 13 Wang Jun, Chen Huizhong, Zuo Huaiyu, et al.. Pre-scheduling for imaging requests of earth observing satellites based on time ordered acyclic directed graph[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(5): 608-614.
王 钧, 陈慧中, 左怀玉, 等. 基于时间序有向图的对地观测卫星成像预调度[J]. 兵工学报, 2008, 29(5): 608-614.
- 14 Jing Fei, Wang Jun, Li Jun, et al.. A new scheduling method for multi-satellite data transmission based on squeaky-wheel optimization [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 863-870.
经 飞, 王 钧, 李 军, 等. 基于吱呀轮优化的多卫星数传调度问题求解方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 863-870.
- 15 Guo Yuhua, Li Jun, Jin Xiaoshan, et al.. Imaging scheduling of an earth observing satellite with complex constraints[J]. Acta Electronic Sinica, 2009, 37(10): 2326-2332.
郭玉华, 李 军, 靳肖闪, 等. 复杂约束对地观测卫星成像调度技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2326-2332.
- 16 S Rojanasoonthon, J Bard. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows[J]. Journal on Computing, 2005, 17(1): 32-51.
- 17 Chen Lijiang, Wu Xiaoyue, Li Yunfeng. Scheduling algorithm for relaying satellite based on temporal flexibility [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.
- 18 Gu Zhongshun. Research on the Relay Satellite Dynamic Scheduling Problem Modeling and Optimizational Technology

- [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- 顾中舜. 中继卫星动态调度问题建模及优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- 19 Fang Yanshen, Chen Yingwu, Gu Zhongshun. CSP model of the relay satellite scheduling[J]. Journal of 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.
- 20 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.
- 21 Stefan Voget, Michael Kolonko. Multidimensional optimization with a fuzzy genetic algorithm[J]. Journal of Heuristics, 1998, 4(3): 221-244.
- 22 Stephen Warshall. A theorem on boolean matrices[J]. Journal of the ACM, 1962, 9(1): 11-12.

栏目编辑: 王晓琰