

自适应遗传算法的数据中继卫星光网络资源调度算法

赵卫虎^{1,2}, 赵静¹, 赵尚弘¹, 李勇军¹, 董毅², 李轩¹

- (1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077;
2. 西安通信学院, 陕西 西安 710016)

摘要: 以数据中继卫星光网络系统资源、任务和约束条件为参量, 以任务对资源的选择为优化对象, 提出了一种基于自适应遗传算法的数据中继卫星光网络资源调度算法。综合考虑多中继星、多时间窗口、多光学天线以及任务优先级要求, 建立调度模型; 采用“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”的调度操作, 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, 获得调度任务的总权值并将其作为参量计算适应度值, 最后通过改进的自适应遗传算法对不同调度方案进行寻优。以3颗中继星、12颗用户星, 6个光天线, 60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, 适应于多任务、多天线的中继卫星光网络系统资源调度。

关键词: 数据中继卫星光网络; 资源调度; 时间窗口更新; 自适应遗传算法

中图分类号: TP390 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1311-06

Scheduling algorithm for data relay satellite optical network based on self-adaptive genetic algorithm

Zhao Weihu^{1,2}, Zhao Jing¹, Zhao Shanghong¹, Li Yongjun¹, Dong Yi², Li Xuan¹

- (1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Xi'an Communication College, Xi'an 710106, China)

Abstract: According to the resources, missions and restraints of the data relay satellite optical network, a scheduling algorithm based on improved self-adaptive genetic algorithm was put forwarded. Considering the multi-relay satellite, multi-window, multi-optical-antenna and multi-mission PRI, the model was established. The missions were scheduled by the scheduling operates: the ascertainment of current mission scheduling time and the refreshment of latter mission time-window. The whole weight of the scheduled missions was set as the cost value and the scheduling schemes were optimized by the self-adaptive genetic algorithm. The simulation scene including 3 relay satellites, 12 user satellites, 6 antennas and 60 missions, the result reveals that the algorithm obtains satisfactory results in both time and optimization which is suitable in multi-user, multi-mission and multi-optical-antenna recourse scheduling.

Key words: data relay satellite optical network; resources scheduling; time windows refreshment; self-adaptive genetic algorithm

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介: 赵卫虎(1986-), 男, 博士生, 主要从事卫星光通信方面的研究。Email: 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研究。Email: Zhaoshangh@aliyun.com

0 引言

随着成像卫星和侦察卫星等大容量数据卫星的不断发展,数据中继需求迅猛增加^[1]。星间通信受到约束条件苛刻,采用微波通信难以满足大容量数据的中继需求^[2]。随着近年来星间光通信技术的不断突破,构建中继卫星光网络成为了应对此问题的有效解决方案^[3-5]。为满足星间海量数据中继传输的需求,对中继卫星光链路资源的优化调度显得日益重要和迫切。

针对资源调度问题,参考文献[6]采用并行机调度理论对美国的数据中继卫星系统调度问题进行研究,模型分析了两个时间窗口的调度特点。参考文献[7]基于约束满足模型,对数据中继卫星调度问题进行建模,并采用约束满足理论进行求解,提供了数据中继卫星单址链路调度问题一种解决方案。参考文献[8]分析了数据中继卫星动态调度问题,采用动态扩展或删除树搜索算法求解。这些研究主要针对单中继星微波单址链路的调度问题,并未针对中继卫星网络进行资源调度。参考文献[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,对实例进行了常入分析,然而其算法优化效率的相对较低。参考文献[10]针对微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度问题,建立调度规划模型,并通过验证了算法有效性。

文中分析中继卫星光网络资源调度问题的特点并建立了数学模型,提出一种基于自适应遗传算法的中继卫星光网络资源调度算法。综合考虑多中继星、多光学天线、多时间窗口以及任务优先级,采用“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”的调度操作,对不同资源的任务集合进行调度安排,并通过改进的自适应遗传算法对不同调度方案进行寻优。最后设置 3 颗中继星、12 颗用户星,6 个光学天线,60 个任务的仿真场景对文中算法进行仿真验证。

1 中继卫星光网络资源调度特点

随着卫星光通信的不断发展以及用户星数据中继需求的不断增加,中继链路负载越来越高,必然会出现多颗用户星同时向中继卫星提出接入请求的问

题。由于星间光通信无法像地面网络一样实现频繁切换,且星间光通信的接入需要提前获知卫星位置从而实现搜索、捕获和对准,因此,中继星的多用户星光传输接入控制问题即为光网络全局资源调度问题。如何根据用户星需求和中继卫星光链路资源情况,确定各数据星的接入时机和中继卫星光网络资源的分配方法,是中继卫星光网络系统建设亟需解决的问题。

一个典型的中继卫星光网络的系统框架如图 1 所示。3 颗 GEO 卫星通过光链路构成高速数据中继骨干网,每个 GEO 卫星可为低轨数据星提供多条光链路,再通过下行链路将数据回传至地面。低轨数据星的接入和中继卫星光网络资源的调度存在很多约束,主要可见时间窗口、任务优先级、任务有效时间和光网络资源利用情况等约束,可对其进行建模转化为一类约束满足问题 (Constraint Satisfaction Problem, CSP)。

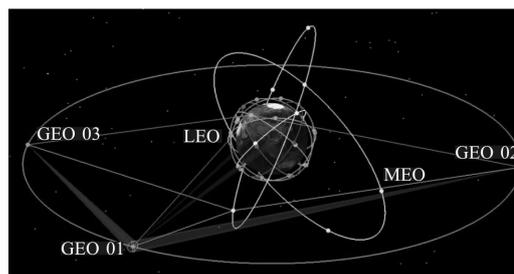


图 1 数据中继卫星光网络系统结构

Fig.1 Framework of data relay satellite optical network

2 约束规划模型

中继卫星光网络资源调度问题可以看作一类 CSP 问题,CSP 是计算机科学和人工智能研究的核心问题之一^[7]。调度优化问题的关键是如何将对资源的约束描述为条件满足模型,并采用最优化算法搜索满足约束模型最佳调度方案。

2.1 约束条件说明(其中均有 $i=1,2,\dots,N$)

(1) 通信任务集 $J=\{j_1, j_2, \dots, j_N\}$, N 表明需要安排调度的通信任务数量。

(2) 任务调度标识集 $\text{Flag}=\{\text{flag}_1, \text{flag}_2, \dots, \text{flag}_N\}$, $f_i \in \{0, 1\}$, $\text{flag}_i=1$ 或 $\text{flag}_i=0$ 表示通信任务 j_i 被安排调度或未被安排调度。

(3) 任务的优先级 $p_i \in \{1, 2, \dots, p_{\max}\}$, p_{\max} 为正数,表示任务的最高优先级。

(4) 任务 j_i 安排调度执行时必须满足窗口约束。任务开始执行的时刻为 S_i , 任务的持续时间为 T_i 。 $STW_i^k \leq S_i \leq ETW_i^k - T_i$ 表示任务 j_i 必须在其第 k 个可见时间窗口 $[STW_i^k, ETW_i^k]$ 内执行完毕。 STW_i^k 表示任务 j_i 的第 k 个可见时间窗口的开始时刻, ETW_i^k 表示任务 j_i 的第 k 个可见时间窗口的结束时刻。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。

(5) $T_s \leq S_i \leq T_e, T_s \leq S_i + T_i \leq T_e$, 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。 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。

2.2 模型表示

$$\begin{aligned} & \text{Max: } \sum_{i=1}^N \text{flag}_i p_i \\ & \text{S.T.: } J = \{j_1, j_2, \dots, j_N\} \\ & \text{flag}_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, N \\ & p_i \in \{1, 2, \dots, p\}, i=1, 2, \dots, N \\ & W_i \in \{W_1, W_2, \dots, W_N\}, \text{其中: } W_i = \bigcup_{k=1}^{TW_i} [STW_i^k, ETW_i^k], \\ & \quad i=1, 2, \dots, N \\ & \text{IF } STW_i^k \leq S_i \leq ETW_i^k - T_i, \text{flag}_i = 1 \\ & T_s \leq S_i \leq T_e, T_s \leq S_i + T_i \leq T_e, i=1, 2, \dots, N \quad (1) \end{aligned}$$

目标函数 $\text{Max: } \sum_{i=1}^N \text{flag}_i p_i$ 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。

3 基于改进自适应遗传算法的资源调度算法

根据中继卫星光网络资源调度模型生成调度方案并计算目标函数, 采用人工智能算法对调度方案进行寻优。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、约束满足等问题并取得了良好的成果^[8]。

3.1 遗传算法的编码设计

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是针对离散问题提出的一种进化算法, 具有很强的全局搜索能力, 其思想来源于“物竞天择、适者生存”的自然法则。算法中每个个体代表问题的一个解, 称为染色体, 解的好坏用适应度值来评价。调度问题的每个解即为一个调度方案, 有 N 个决策变量, 即染色体的 N 个基

因。每个编码基因设计为 $[x_a, x_b]$, x_a 和 x_b 分别为任务的调度次序和所选择的资源。文中采用精英保留策略改进遗传算法, 以增强算法的局部搜索能力, 并采用自适应交叉、变异算子以增强算法跳出局部最优能力。

3.2 自适应交叉、变异算子

文中设计一种混合的自适应交叉、变异算子, 令 P_c 和 P_m 分别为交叉和变异概率。当种群陷入局部最优时, 其个体的适应度值将趋于一致; 此时种群多样性较差, 因此, 选择较大的 P_c 和 P_m 可增加新个体的产生, 利于跳出局部最优。在算法初始阶段或种群适应度值较分散时, 选择较小的 P_c 和 P_m 利于保留精英个体, 可加快算法的收敛; 因此, 采用下式具体计算自适应交叉概率和变异概率:

$$P_c = \begin{cases} k_1 & f_c < f_{\text{avg}} \\ \frac{k_2(f_{\text{max}} - f_c)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f_c \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 & f_m < f_{\text{avg}} \\ \frac{k_4(f_{\text{max}} - f_m)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f_m \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1, k_2, k_3, k_4 为 0~1 之间的常数; f_{avg} 为种群的平均适应度值; f_{max} 为种群的最大适应度值; f_c 为交叉个体平均适应度值; f_m 为要变异个体的适应度值。

3.3 适应度函数的设计

在传统的遗传算法中个体被选择的概率与个体适应度值成正比, 而适应度函数设置不当会影响算法的性能。为克服此不足, 文中采用精英保留策略的遗传算法, 即将每代中最优秀的部分个体直接遗传到下代。因此适应度函数只要能反映个体的优劣即可, 文中设计的适应度函数如下所示:

$$\text{Fitness} = \sum_{i=1}^N \text{flag}_i \cdot p_i - \frac{T_e}{T_e} \quad (4)$$

式中: N 为任务量, 即个体中决策变量的个数。 $\text{flag}_i \cdot p_i$ 定义为: “加权任务完成量”; 由于具有相同“加权任务完成量”的个体较多, 因此文中的取方案结束时刻最早的个体为最优个体。设 T_e 为调度方案的结束时刻, 即调度方案中最后一个任务的结束时刻, T_e 为本阶段调度任务的最后时刻。 T_e/T_e 定义为“归一化完成时间”。适应度函数取 $\text{flag}_i \cdot p_i$ 与 T_e/T_e 的差值, 可确保最优个体的“加权任务完成量”最大, 且在同任务完成量的方案中结束时刻最早。

3.4 适应度函数的计算

每个调度方案有 N 个决策变量,不同的决策变量取值将有不同调度效果。如何快速获得任务的调度结果,即对产生的新个体(不同的决策变量)进行快速评价,是算法提高效率的关键。文中采用基于时间窗口更新的循环迭代算法,从而快速获得任务的调度结

果。首先依据任务所选择的不同天线资源把任务分为不同的集合,然后根据任务的调度次序,基于 CSP 模型进行判断,获得每个任务的调度标识和执行时间,最后根据公式(4)计算得到个体的适应度值。调度主要包括“确定当前任务时间窗口”和“更新后续任务时间窗口”两个操作,具体流程如图2所示。

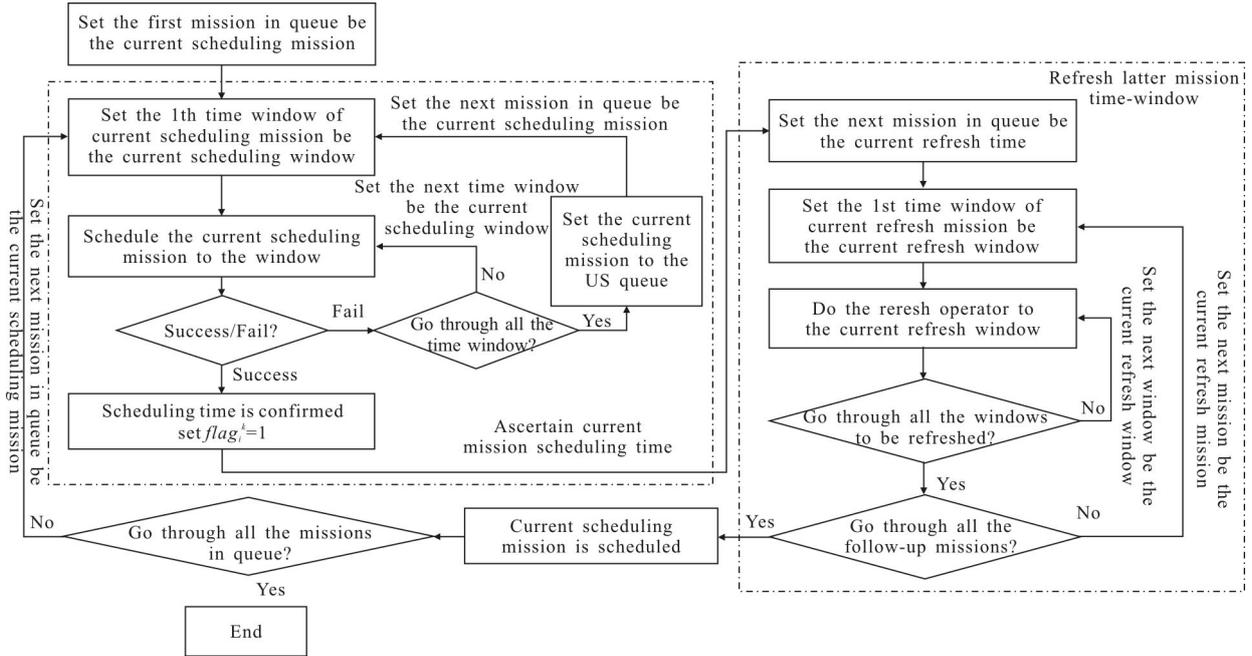


图 2 任务的调度流程

Fig.2 Process of mission scheduling

3.5 算法步骤

(1) 初始化种群规模 N_{scale} 和最大迭代次数 $N_{generation}$, 并设置相应的遗传参数 k_1, k_2, k_3, k_4 。

(2) 确定各约束条件, 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天线资源序号, 对任务调度序列对应的染色体进行编码。根据图2 流程执行调度方案, 采用公式(4)计算所有个体的适应度值, 并计算种群的平均适应度值和最大适应度值。

(3) 将种群个体随机两两配对, 作为遗传操作的两个父个体。

(4) “交叉”: 根据公式(2)计算两个父个体的交叉概率 P_c , 并依概率进行交叉操作得到两个子个体; 即将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。

(5) “变异”: 根据公式(3)计算两个父个体的变

异概率 P_m , 并对两个子个体依概率进行变异操作, 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。

(6) “选择”: 采用精英保留策略。将“当前种群”按适应度值大小进行排序, 选择前 N_{scale} 个个体作为下一次遗传操作的父代个体。

(7) 若迭代次数达到最大值, 算法结束, 选择种群中最优个体作为最优调度方案。否则, 转 Step3。

4 仿真及结果分析

4.1 仿真场景

设中继卫星 GEO 01 星、02 星和 03 星的位置分别为东经 60° 、东经 180° 和西经 60° 赤道上空, 设每个中继卫星上预留给用户星 2 个光学天线终端, 仿真时段为 00:00:00~04:00:00。选取 4 类不同轨道高度上的用户卫星, 其数据见表 1。

表 1 用户星基本情况

Tab.1 Basic situation of user satellites

Satellite	LEO 01/02 /03	LEO 04/05 /06	LEO 07/08 /09	LEO 10/11 /12
Altitude	400 km	800 km	1 000 km	1 200 km
Inclination angle	35°/45°/55°	35°/45°/55°	35°/45°/55°	35°/45°/55°

利用 STK 对用户星进行可见性分析,获得中继卫星与用户星间的可见时间窗口。设每个用户星发起 5 个任务(依次发起,则 LEO01 星的任务为 J_1 、 J_{13} 、 J_{25} 、 J_{37} 、 J_{49} ,其它用户星任务依此类推),一共 60 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 2 所示。

表 2 用户星发起任务列表

Tab.2 Mission list in user satellite

Mission	Time/s	PRI															
J_1	1 105	4	J_{11}	1 450	2	J_{21}	270	1	J_{31}	1 189	2	J_{41}	1 150	3	J_{51}	1 176	2
J_2	785	2	J_{12}	1 271	3	J_{22}	1 463	2	J_{32}	1 810	5	J_{42}	1 474	8	J_{52}	1 507	9
J_3	1 192	8	J_{13}	1 014	2	J_{23}	1 248	3	J_{33}	1 071	6	J_{43}	1 235	5	J_{53}	944	2
J_4	744	3	J_{14}	1 161	5	J_{24}	1 701	10	J_{34}	671	4	J_{44}	1 644	2	J_{54}	433	3
J_5	138	2	J_{15}	1 314	2	J_{25}	684	10	J_{35}	2 313	3	J_{45}	944	5	J_{55}	1 368	4
J_6	784	5	J_{16}	328	5	J_{26}	1 103	1	J_{36}	277	7	J_{46}	1 644	8	J_{56}	978	7
J_7	1 775	4	J_{17}	311	10	J_{27}	1 384	10	J_{37}	337	3	J_{47}	1 671	4	J_{57}	977	4
J_8	1 368	3	J_{18}	1 158	4	J_{28}	1 641	5	J_{38}	1 654	9	J_{48}	1 307	3	J_{58}	747	2
J_9	780	5	J_{19}	981	2	J_{29}	750	2	J_{39}	1 131	4	J_{49}	1 761	1	J_{59}	1 977	3
J_{10}	1 144	4	J_{20}	1 440	4	J_{30}	1 357	1	J_{40}	1 811	1	J_{50}	771	4	J_{60}	1 779	5

4.2 结果分析

采用改进的自适应遗传算法(种群规模为 50,迭代次数为 100)对任务进行调度,算法搜索得到的全部任务完成的时间为 11.208 4s,算法搜索过程如图 3 和图 4 所示。

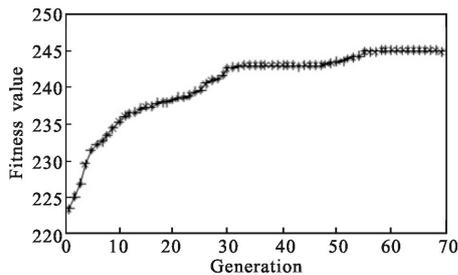


图 3 各代群体平均适应度值的记录

Fig.3 Average fitness values in each generation

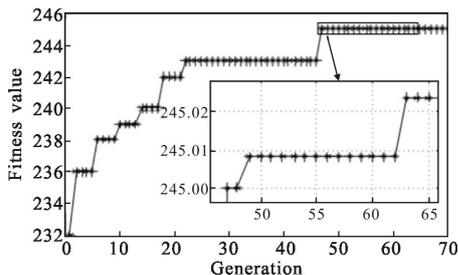


图 4 各代最优个体适应度值的记录

Fig.4 Best fitness values in each generation

(1) 自适应遗传算法分析

由图 3 和图 4 可知,种群在 30 代后已基本收敛,表明算法具有较快的寻优速度。由图 4 中第 47 代个体最优适应度值出现了一次较大的攀升,表明改进的遗传算法在搜索后期能自适应调整交叉和变异概率,从而跳出局部最优。由图 4 局部放大图可知,由于“归一化完成时间”为小于 1 的小数,算法在收敛后出现了两次较小的跳跃,表明算法搜索过程中找到最大的“加权任务完成量”后,继续寻优“归一化完成时间”更小的值,从而获得更优的调度方案。

(2) 调度结果分析

3 颗中继星不同光天线资源上任务执行时间如图 5 所示。不同任务用不同的色条表示,其长度反映任务的执行时间,色条上的标签显示任务序号和任务选择的的天线资源。设调度周期为 14 400 s(4 h),最后任务执行结束时间为 14 058 s。完成 58 个任务,完成率为 96.666 7%;完成任务权值总和为 246,完成率为 97.619 0%。未调度任务为任务 35 和 59,优先级均为 3。考虑到有限的天线和时间资源,文中采用的改进自适应遗传算法获得了较为满意的调度结果。

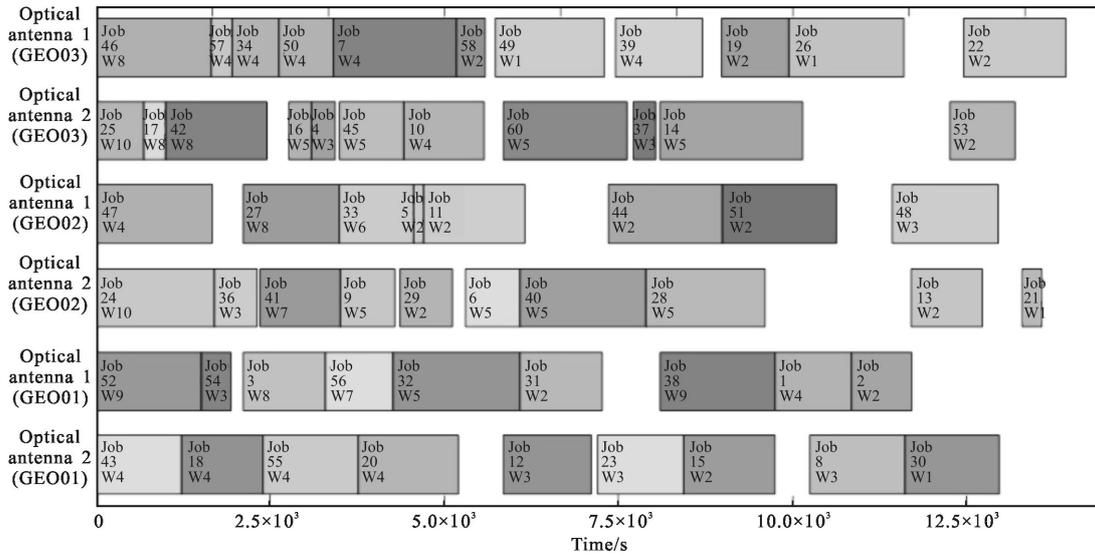


图 5 任务调度结果甘特图

Fig.5 Gantt Chart of scheduling result

5 结论

星间激光通信需要提前进行捕获、跟踪和对准(ATP),因此数据中继卫星光网络的接入需要提前规划,以提高资源利用率和任务完成量。文中通过分析中继卫星光网络资源调度的特点,建立了约束规划模型,提出了一种基于自适应遗传算法的中继卫星光网络资源调度算法。该算法针对中继卫星光网络资源调度的特点,动态更新可见时间窗口以对选择不同资源的任务进行调度,以任务的总权值和任务的完成时间为参量计算适应度值,最后通过改进的自适应遗传算法对不同调度方案进行寻优。遗传算法引入精英保留策略以提高局部寻优能力,采用自适应遗传因子以增强跳出局部最优解的能力。仿真结果表明该算法具有较快的搜索速度,通过改进自适应遗传算法和适应度函数,增强了算法全局优化能力,获得了较为满意的调度结果,表明算法能够适用于未来中继卫星光网络系统的资源调度问题。

参考文献:

- [1] Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3103-3110. (in Chinese)
- [2] Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite[C]//SPIE, 2011, 79230B: 1-6.
- [3] Cesarone R J, Abraham D S, Shambayati S. Deep-space optical communications [C]//International Conference on Space Optical Systems and Application, 2011, 8: 410-423.
- [4] Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, et al. Laser communication terminals for the european data relay system [C]//SPIE, 2012, 82460D: 1-7.
- [5] Teles J, Samii M V, Doll C E. Overview of TDRSS[J]*Adv Space Res*, 1995, 16(12): 67-76.
- [6] Rojanasoonthon S, Bard J. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows [J]. *Journal on Computing*, 2005, 17(1): 32-51.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Zhang Yan, Sun Zhanjun, Li Jian. Study of TDRS dynamic scheduling problem[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1464-1468. (in Chinese)
- [9] Dick Stottler. Satellite communication scheduling, optimization, and deconfliction using artificial intelligence techniques [C]//AIAA Infotech@Aerospace, 2010: 1-9.
- [10] Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun. Scheduling algorithm for data relay satellite with microwave and laser hybrid links [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1005005-1-8. (in Chinese)