

基于改进 NSGA-II 算法的微波/光混合链路中 中继卫星多目标资源调度算法

赵 静 赵卫虎 李勇军 赵尚弘 王 翔 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,研究了具有微波和激光混合链路的中继卫星系统资源调度问题。以可见时间窗口、任务优先级、终端功耗为约束条件,建立了微波/光混合链路中继卫星系统资源调度(ML-DRSSP)的多目标约束规划模型;通过设计自适应交叉、变异算子和基于精英保留的选择算子,改进了非支配排序遗传算法(MNSGA-II)并对模型求解。以 1 颗中继星、4 颗用户星、3 种资源终端和不同任务规模为条件建立了仿真场景。仿真结果表明该算法在保持解多样性的同时使非劣解集尽可能接近问题的 Pareto 最优解集,因而能够有效解决具有多任务、多类型天线的 ML-DRSSP。

关键词 光计算;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/CJL201340.1205003

Multi-Objective Resources Scheduling Algorithm for Microwave and Laser Hybrid Links Data Relay Satellite Based on Improved NSGA-II Algorithm

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

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

Abstract According to the developed trend for the combination of microwave and laser links in the future data relay satellite system, the resources scheduling problem in data relay satellite system based on microwave and laser links is studied. A multi-objective constrained programming model for microwave and laser links data relay satellites scheduling problem (ML-DRSSP) is presented under the constraint condition of visible time window, mission priority and power consumption of the terminal. By designing the self-adaptive cross, mutation operator and selection operator based on elitism selection, a modified non-domination sorting genetic algorithm II is improved and the model is solved. A scene simulation is set up on the conditions of a data relay satellite, four user satellites, three resource terminals and scale of different tasks. The simulation results show that the algorithm, by keeping the solution diversity and making non-inferior solution set close as possible to the Pareto optimal solution set, can solve ML-DRSSP with multi-tasking and multi-type antennas, effectively.

Key words optics in computing; data relay satellite; microwave and laser hybrid link; resources scheduling; multi-objective optimization; time window refreshing

OCIS codes 200.2605; 200.3050; 200.3760

1 引言

随着深空探测、遥感遥测、高分辨率对地观测等领域的不断发展,作为未来天基综合信息网重要组成

部分的数据中继卫星系统,将在空间信息传输中发挥极其重要的作用,这对中继系统的海量信息传输和处理转发能力提出了苛刻的要求^[1-3]。为满足星间大

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-08-08

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

容量数据传输的需求,星间激光链路成为数据中继卫星系统发展的主要方向,而下一代宽带、可靠的数据中继系统必将是微波与激光两者优势互补建立的信息系统^[4-11]。随着卫星激光通信链路性能的不提高,多星组网将是必然的发展趋势,中继卫星资源的资源调度优化问题显得日益迫切和重要^[12]。

微波与激光链路共存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,其资源调度问题需要考虑不同天线资源所对应的星间传输速率及切换时间对于调度方案的影响,以及可见时间窗口、任务优先级、终端功耗等约束,是一个复杂的多目标组合优化问题。目前关于卫星资源调度问题的研究都只针对微波链路,文献[13]利用标准遗传算法解决了高分辨率成像卫星调度问题。文献[14]针对卫星通信系统中的高强度天线资源约束提出了一种基于人工智能技术的无冲突优化调度算法。文献[15]针对对地观测卫星调度问题提出了一种基于快速路径搜索的多目标调度算法。文献[16]基于人工智能技术理论,建立了卫星系统的混合网络结构,并对其调度问题进行了优化寻优,结果表明该智能调度算法不仅能够减少调度活动的人力需求,而且大大提高了卫星通信容量。文献[17]针对美国的跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS),建立了混合整数规划模型,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,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。

本文针对微波/光混合链路中继卫星系统资源调度问题(ML-DRSSP),建立了 ML-DRSSP 多目标约束规划模型,提出了改进型非支配排序遗传算法(MNSGA-II),设计了仿真场景并对该模型及算法进行了仿真验证。仿真结果表明此算法在保持解多样性的同时致力于逼近问题的 Pareto 解最优面,能够有效求解具有多任务、多类型天线的 ML-DRSSP。

2 ML-DRSSP 问题描述

ML-DRSSP 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。调度方案应保证未完成任务优先级尽可能小。由于中继卫星星上存储容量有限,且调度具有一定时效性要求,调度目标要求系统资源能耗尽可能小,同时保证系统任务调度完成时间尽量短。基于以上考虑,调度问题的多目标约束规划模型定义如下。

2.1 参数说明

S : 用户卫星集合, $|S|=N$, N 代表用户卫星数量

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 : 天线资源集合, M 代表资源数量

$[T_s, T_E]$: 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 : 调度持续时间, $T_D = T_E - T_s$

T_e : 所有任务完成调度时刻

p_i : 任务 i 的优先级, $i \in J$

E_B : 调度初始时中继卫星上存储的能量

n_i : 任务 i 的可见时间窗口数量, $i \in J$

W_i : 任务 i 的可见时间窗口集合, $W_i = \bigcup_{k=1}^{n_i} [S_i^k, E_i^k]$ 任务 i 的第 k 个可见时间窗口 $[S_i^k, E_i^k]$, 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

d_i^m : 任务 i 在天线 m 上的执行传输时间, $i \in J$, $m \in M$

t_m : 天线 m 连续执行任务所需的切换时间, $m \in M$

P_c^m : 天线 m 的平均功耗, $m \in M$

P_s^m : 天线 m 连续执行任务所需的切换功耗, $m \in M$

P_g : 中继卫星运行过程中获得的平均功率

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, $m \in M$

s_i : 任务 i 传输开始时刻

x_i^k : 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, $x_i^k = 0$; 否则, $x_i^k = 1$

2.2 多目标约束规划模型

基于上述定义,建立微波/光混合链路中继卫星系统多目标约束模型如下:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{k \in \{1, 2, \dots, n_i\}} \sum_{i \in J} x_i^k p_i$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{m \in M} \sum_{i \in J^s} (P_c^m \cdot d_i^m + P_s^m \cdot t_m)$$

$$\text{Min } f_3 = T_e$$

$$\text{S. T. } 1) \sum_{k \in \{1, 2, \dots, n_i\}} \sum_{s \in S_i} x_i^k \leq 1, \forall i \in J$$

$$2) S_i^k \leq s_i \leq E_i^k - d_i^m, \text{ if } x_i^k = 0, \\ i \in J^s, k \in \{1, 2, \dots, n_i\}$$

$$3) s_j = s_i + d_i^m + t_m, \text{ if } j \text{ after } i, j \in J^s$$

$$4) T_s \leq s_i \leq T_E, T_s \leq s_i + d_i^m \leq T_E, i \in J^s$$

$$5) \sum_{m \in M} \sum_{i \in J^s} P_c^m \cdot d_i^m + \sum_{m \in M} E_s^m \leq E_B + P_g \cdot T_D$$

上述模型中,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;目标函数 f_2 代表调度的目标是保证系统资源总能耗最小;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。约束条件 S, T, 中,约束 1) 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 2) 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执行;约束 3) 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 4) 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 5) 表示中继卫星通信活动应满足的能量约束条件。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下传至地面站,即满足星上存储容量约束。

3 基于改进 NSGA-II 的优化调度算法

ML-DRSSP 本质上是一个多约束条件下的复杂多目标优化问题。多目标进化优化算法在求解此类问题时,无需偏好信息即可对多个目标同时进行优化,且其并行机制使算法运行一次就能得到问题的 Pareto 最优解集。本文借鉴传统非支配排序遗传算法(NSGA)的非劣分层和拥挤度密度排序的思想,引入精英策略的选择机制和自适应交叉、变异算子,提出了一种改进 NSGA-II 算法的资源调度多目标优化算法 MNSGA-II,提高了算法的局部优化能力,实现了最优解集的进一步优化。MNSGA-II 遗传算法流程如图 1 所示。

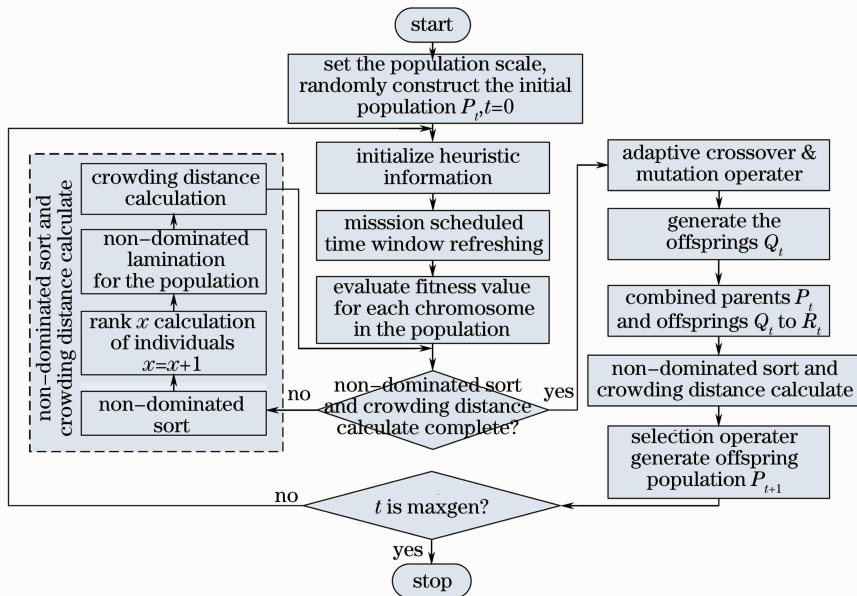


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

3.1 初始种群构造

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。文中染色体编码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。编码过程:1) 将所有的任务按优先级由大到小排序,对于优先级相同的任务,根据任务大小由小到大排序;2) 将任务序列所选择的天线资源号编码为染色体的基因。解码过程:按照编码序号选择天线资源,将其安排在该资源的可见时间窗口内执行传输,若不能完成传输,则将该任务放入未调度任务序列。初始种群构造流程如图 2 所示。

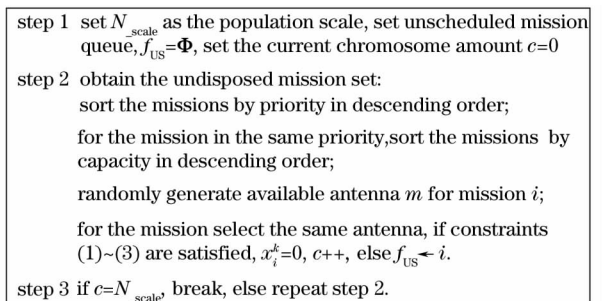


图 2 初始种群构造流程

Fig. 2 Construction process of initial population

3.2 时间窗口更新操作

可见时间窗口是中继卫星调度中的一个重要约

束条件。在对任务进行验证判断的过程中,每个任务的成功调度将占用部分或一个可见时间窗口,进而对后续任务的调度产生影响。为了保证每个任务调度时其可见时间窗口的真实可用,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,利用可见时间窗口更新的调度方法能够最大限度地利用可见时间窗口,使解集更接近最优解。时间窗口更新情况如表 1 所示。

表 1 时间窗口更新
Table 1 Time window refreshing

Relationship	Time sequence	Refreshing operator
Across forward $s_i \leq S_j^k \ \& \ S_j^k < e_i < E_j^k$		Time window $[S_j^k, E_j^k]$ refresh to $[e_i, E_j^k]$
Across backward $e_i \geq E_j^k \ \& \ S_j^k < s_i < E_j^k$		Time window $[S_j^k, E_j^k]$ refresh to $[S_j^k, s_i]$
Contain $s_i > S_j^k \ \& \ e_i < E_j^k$		Time window $[S_j^k, E_j^k]$ refresh to $[S_j^k, s_i]$ and $[e_i, E_j^k]$
Bestrow $s_i \leq S_j^k \ \& \ e_i \geq E_j^k$		Time window $[S_j^k, E_j^k]$ refresh to unfeasible, and set the window deleted
Outlying $e_i < S_j^k \ \parallel \ s_i > E_j^k$		Time window $[S_j^k, E_j^k]$ remain the same

3.3 快速非支配排序

快速非支配排序的执行过程由三部分组成:1) 根据目标函数值进行非劣分层,将当前种群中所有非劣解个体划分为同一等级,令其“秩”为 1;2) 将这

些个体从种群中移出,在剩余个体中找出新的非劣解集,令其“秩”为 2;3) 重复上述过程,直至种群中所有个体都被设定相应的等级。快速非支配排序流程如图 3 所示。

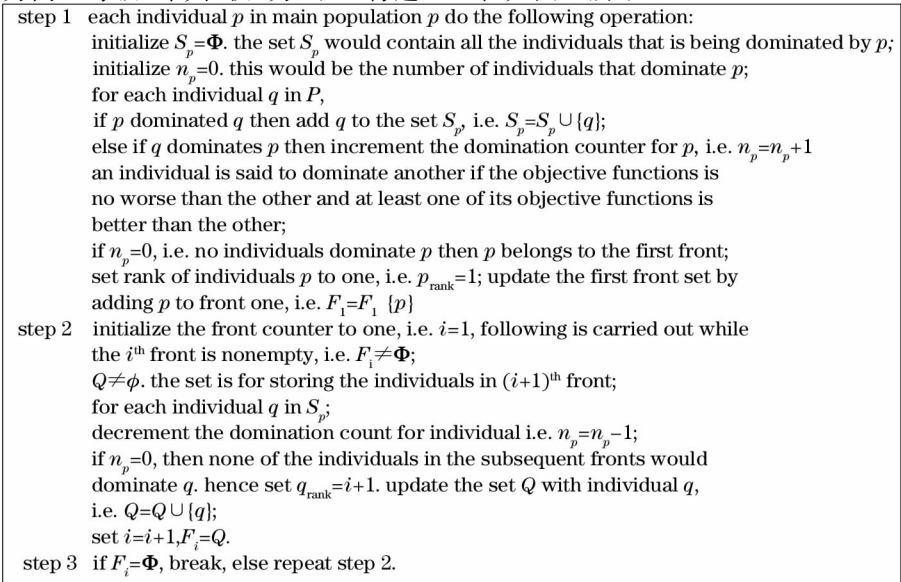


图 3 快速非支配排序流程图

Fig. 3 Flow chart of non-dominated sorting quickly

3.4 基于小生境尺寸的拥挤距离排序

拥挤距离用来估计一个解周围其他解的密集程度,对于每个目标函数,先根据该目标值的大小对非支配解集 F_i 中的解排序,对于每个解 i 计算由解

$i+1$ 和 $i-1$ 构成的立方体的平均边长,最终结果是解 i 的拥挤距离 $i_{distance}$ 。边界解(某个目标函数值最大或最小)的拥挤距离为无穷大。如(2)式计算

$$i_{distance} = \begin{cases} +\infty, & f_k^{max} = f_k^{min} \ || \ f_k(i) = f_k^{max} \ || \ f_k(i) = f_k^{min} \\ \sum_{k=1}^m \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{max} - f_k^{min}}, & f_k^{max} \neq f_k^{min} \end{cases} \quad (2)$$

式中 m 为目标函数个数, f_k 为第 k 个目标函数,拥挤距离越大,则说明染色体 i 周围的点越稀疏,在进化时应给以较大的保留概率,从而保证种群多样性。通过这种小生境划分,对同属于一个非劣前等级的个体就可根据个体拥挤距离不同,选择拥挤距离较大的个体进入下一代种群,以此保持分布多样性。拥挤距离排序是建立在拥挤比较算子 ($>_n$) 的基础上, $i >_n j$ 当且仅当“ $i_{rank} > j_{rank}$ ”或者“ $i_{rank} = j_{rank}$ 且 $i_{distance} > j_{distance}$ ”时成立。

3.5 自适应交叉、变异算子

采用一种混合的自适应交叉、变异算子,即不同个体采用不同的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 。当个体适应度值小于平均适应度值时,选择较小的 P_c 和 P_m 有利于优秀个体的保留;当个体适应度值大于平均适应度值时,选择较大的 P_c 和 P_m 有利于新个体的产生。当种群中个体适应度值趋向于一致或局部最优时,整体 P_c 和 P_m 较大,利于跳出局部最优;当适应度值较分散时,整体 P_c 和 P_m 较小,有利于算法的收敛。因此,采用的自适应交叉概率和变异概率如(3)式所示。

$$P_c = \begin{cases} k_1, & f_c \geq f_{avg} \\ \frac{k_2(f_c - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}}, & f_c < f_{avg} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3, & f_m \geq f_{avg} \\ \frac{k_4(f_m - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}}, & f_m < f_{avg} \end{cases}$$

式中 f_{avg} 为种群的平均适应度值, f_{min} 为种群的最小适应度值, 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, k_1, k_2, k_3, k_4 为大于 0 小于 1 的常数。

3.6 基于精英策略的选择机制

绝大多数进化算法都是通过个体适应度大小确定个体在后代进化中的出现概率,从而提高全局的收敛和计算效率。采用基于精英保留策略的选择机制,保留父代中的优良个体直接进入子代。采用方法为:将父代与子代合成一个种群,对种群中个体进行非支配排序和拥挤距离计算,按照个体等级和拥挤距离由大到小选择个体进入下一代进化。选择操作流程如图 4 所示。

step 1 the parent population P_t of N_{scale} generates the offspring Q_t , combine the parents and offspring to a population R_t of $2N_{scale}$, i.e. $R_t = P_t \cup Q_t$, the population R_t generates the new population P_{t+1} by the elite strategy operator.
 step 2 sort the population R_t and form the non-dominated set $\{F_1, F_2, \dots\}$, set $P_{t+1} = \phi$, $i=1$.
 step 3 if $\|P_{t+1}\| + \|F_i\| \leq N_{scale}$, turn to step 4, else turn to step 5; $\|P_{t+1}\|$ and $\|F_i\|$ are the number of population P_{t+1} and F_i , respectively.
 step 4 $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$, $i=i+1$.
 step 5 calculate the crowding distance of individuals in F_i , and then sort the individuals by the crowding distance in descending order, $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i [1:(N - \|P_{t+1}\|)]$.
 step 6 $t=t+1$, return to step 1.

图 4 选择操作流程图

Fig. 4 Flow chart of selection operator

4 仿真及结果分析

4.1 仿真场景

设计了具有 1 颗中继星、4 颗用户星的场景开展仿真实验。卫星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 个天线资源,天线类型分别为 S 波段、Ku 波段和光学天线,其中 S 波段和 Ku 波段天线均为单址天线。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,用户卫星从 STK (Satellite ToolKit)导入,其数据如表 3 所示。中继卫星与用户星间的可见时间窗口,可利用 STK 进行可见性分析得到。

表 2 天线终端参数

Table 2 Terminal parameters of the antenna

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

表 3 用户星基本情况

Table 3 Basic situation of user satellites

Satellite	LEO 01	LEO 02	LEO 03	LEO 04
Altitude /km	400	1000	1200	1500
Orbit inclination angle / (°)	30	45	60	75

4.2 性能分析

1) 算法收敛特性分析

算法收敛性是进化算法性能的重要衡量指标,任务规模为 64 的仿真实验中,分别记录了进化过程

中的每一代个体中目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 的最优值,目标函数值随遗传代数的进化曲线分别如图 5(a)、(b)、(c)所示。多目标优化算法的主要特点是致力于逼近问题的 Pareto 解最优前沿,而不是一个最优解。基于 MNSGA-II 得到的 Pareto 解最优前沿如图 5(d)所示。

由图 5(a)~(c)可知,随着进化遗传的过程演变,三个目标函数值都得到优化并基本收敛于最优值,表明该 MNSGA-II 算法能够同时对目标函数进行有效的优化。另外需要注意的是三个目标函数值在进化前期快速收敛,在进化后期存在多次进一步寻优过程,表明算法在保持种群多样性,提高全局搜索能力方面的优势。由图 5(d)可知,未完成任务优先级与总能耗及任务调度完成用时成反比,其最优化面上的非劣解可为决策者提供在不同能耗及调度时间限制下的最佳调度方案,最终决策者可根据需要选择出一个或一组“足够满意”的解作为多目标优化问题的最终解。

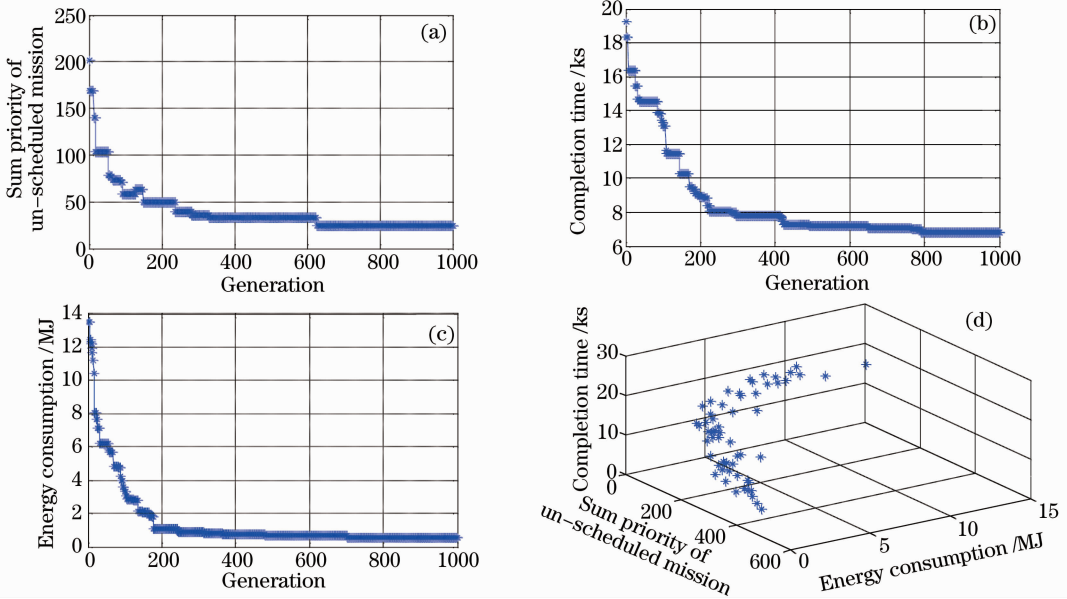


图 5 不同目标函数(a) f_1 、(b) f_2 、(c) f_3 收敛曲线及(d) 基于 MNSGA-II 得到的 Pareto 解最优前沿

Fig. 5 Convergence curves with different goal functions (a) f_1 , (b) f_2 , (c) f_3 and

(d) Pareto front based on MNSGA-II

2) 算法优化性能分析

为了验证算法对于资源调度问题优化性能评价的适用性和可行性,分别取任务规模为 32,48,64,80,96,112 的场景,对算法进行仿真对比验证。任务优先级为 $[0,10]$ 的均匀随机数。图 6~8 比较了基于 MNSGA-II 算法与多目标遗传算法^[18] (MOGA) 的优化性能。为使算法具有可比性,MOGA 算法考虑了可见时间窗口、切换时间等约束条件,并以优化目标

为评价指标对两种算法进行对比。

从图 6 可以看出,MNSGA-II 算法优化结果中未调度任务优先级之和小于 MOGA 算法,平均降低了 66.77%。图 7 比较了在不同任务规模下两种算法优化结果中的总能耗。MNSGA-II 算法中的总能耗要低于 MOGA 算法,平均减少了 69.73%。图 8 是两种算法优化结果的任务调度完成用时,其

中 MNSGA-II 算法的完成用时远远低于 MOGA 算法,平均降低了 35.27%。这是由于将自适应交叉、变异算子引入传统非支配排序遗传算法的思想中,保证了 Pareto 解的多样性,同时采用基于精英策略的选择机制,在扩大搜索空间的同时,能够保证优秀个体在进化过程中总能保留至下一代,有利于算法搜索过程快速收敛到 Pareto 最优前沿。从图中可以看出,无论是未完成任务优先级之和、总能耗还是任务调度完成用时,MNSGA-II 算法优化结果都优于 MOGA 优化结果。

需要注意的是当任务规模增加至 96 个及以上时,两种算法优化结果中未调度优先级之和与总能耗增长幅度较大,而任务调度完成用时增长平缓。这是由于在相同的场景和总时间约束下,中继星与用户星之间的可见时间窗口确定,当任务规模增加至 90 个左右时,激光终端上的最后任务已逼近总时间的结束时刻,其中继能力已基本达到饱和,资源利用率已接近最大值。此时再增大任务规模,任务调度完成用时基本不变,如图 8 所示。

同时由图 7 可以看出,当任务规模较小时,调度结果中总能耗增加幅度较为平缓,而任务规模较大时,总能耗随任务规模增加快速增长。这是由于激光链路传输能力远远高于传统微波链路,在进行资源调度安排中优先选择激光链路进行任务传输。当任务规模较小时,调度算法更倾向于选取激光链路进行传输;随着任务规模增大,激光终端的利用率也逼近最大值,这时增加任务集中在微波链路进行传输,由于激光终端总能耗远远低于微波终端,因此总能耗在任务规模较小时增长平缓而在规模较大时呈快速增长趋势。且由于微波链路传输能力有限,随着任务规模增大,未调度任务量增长幅度呈现增大的趋势,如图 6 所示。

5 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 ML-DRSSP,建立了基于 ML-DRSSP 多目标约束规划模型,通过多目标 MNSGA-II 遗传算法逼近问题的 Pareto 解面,获得 Pareto 解最优面。仿真结果表明该多目标约束规划模型适用于解决具有多任务、多类型天线的 ML-DRSSP,也表明改进的多目标优化算法能够同时对三个目标函数进行优化,且具有较快收敛速度和较高的调度效率。

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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 J Teles, M V Samii, C E Doll. Overview of TDRSS[J]. Adv Space Res, 1995, 16(12): 67-76.

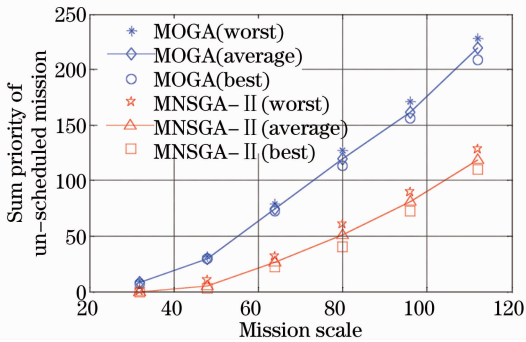


图 6 未调度任务优先级之和比较

Fig. 6 Comparison of sum priorities before scheduling tasks

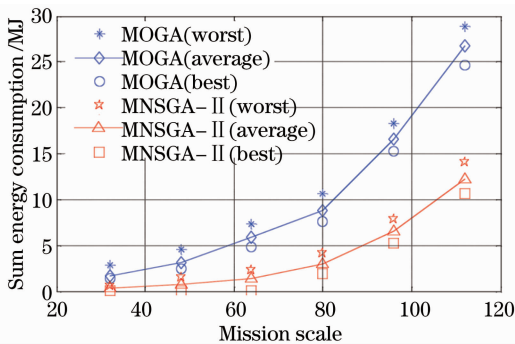


图 7 总能耗比较

Fig. 7 Comparison of power consumptions

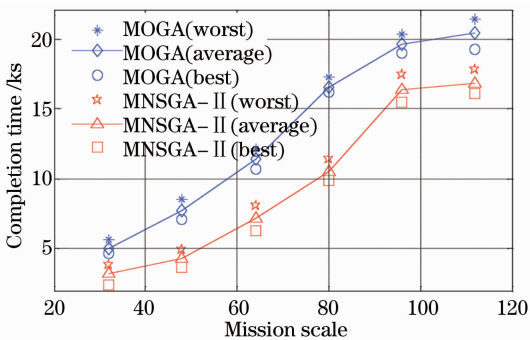


图 8 任务调度完成时刻比较

Fig. 8 Comparison of completion times of scheduling tasks

- 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, 周煜, 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): 1-18. 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): 1-18.
- 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 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.
- 13 Soonmi Han, Seungwoo Beak, Kyuemrae Cho, *et al.*. Satellite mission scheduling using genetic algorithm[C]. *SICE Annual Conference*, 2008. 1226-1230.
- 14 Dick Stottler. Satellite communication scheduling, optimization, and deconfliction using artificial intelligence techniques [C]. *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, 2010. 1-7.
- 15 J Frank, A Jonsson, R Morris, *et al.*. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites[J]. *Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space*, 2001. 1-7.
- 16 J Mohammed, D Stottler. Rapid scheduling of multi-tracking sensors for a responsive satellite surveillance network[C]. *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, 2010. 1-12.
- 17 S Rojanasoonthon, J Bard. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows [J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2005, 17(1): 32-51.
- 18 M Yamamoto, T Yoshikawa, T Furuhashi. A study on interactive search in MOGA with island model based on user's requirements using visualization in NSP [C]. *Second World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, 2010. 490-495.

栏目编辑: 王晓球