

doi: 10.7690/bgzdh.2022.04.015

## 基于改进 NSGA-II 的通信卫星资源动态调度方法

刘文文, 熊伟, 韩驰

(航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室, 北京 101416)

**摘要:** 为应对多变的通信卫星资源调度场景, 提出一种多目标通信卫星资源动态调度方法。分析造成动态调度的扰动因素, 根据不同扰动因素建立相关的多目标动态调度模型, 以调度收益和减小初始任务变动为目标, 采用基于改进 NSGA-II 的通信卫星资源动态调度方法进行求解。仿真结果表明: 该方法将 NSGA-II 与基于参考点的非支配排序相结合能增加种群的多样性, 提供更多有效解决方案。

**关键词:** 通信卫星; 资源调度; 动态调度; 改进 NSGA-II

**中图分类号:** TN927+.2 **文献标志码:** A

## Dynamic Scheduling Method of Communication Satellite Resources Based on Improved NSGA-II

Liu Wenwen, Xiong Wei, Han Chi

(Complex Electronic System Simulation Key Laboratory, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In order to deal with the changeable communication satellite resource scheduling scenarios, a multi-objective communication satellite resource dynamic scheduling method is proposed. The disturbance factors causing dynamic scheduling are fully analyzed, and the related multi-objective dynamic scheduling model is established according to different disturbance factors, and the dynamic scheduling method of communication satellite resources based on improved NSGA-II is used to solve the problem with the goal of scheduling income and reducing the change of initial tasks. The simulation results show that the method combines NSGA-II with non-dominated sorting based on reference point, increases the diversity of the population, and provides more effective solutions.

**Keywords:** communication satellite; resource scheduling; dynamic scheduling; improved NSGA-II

### 0 引言

通信卫星资源调度<sup>[1]</sup>可分为静态和动态 2 种调度方式。静态调度是指在通信卫星资源调度的初始时刻, 在用户提出的任务集、通信卫星的资源集、约束条件等因素都不变的前提下, 建立通信卫星静态调度模型实现资源调度; 动态调度方法是指在方案实施过程中, 出现任务突然增加、资源突发变动等应急情况, 为应对扰动因素, 建立动态调度模型进行及时调整<sup>[2]</sup>。

在卫星资源动态调度的研究方面, 蒋洪磊等<sup>[3]</sup>考虑了任务数量变化, 以资源调度收益最大化为目标重新进行资源调度; Li H J 等<sup>[4]</sup>在多卫星多任务动态调度中考虑了任务时间的动态变化, 以最大程度地减少资源消耗并最大化可调度的任务优先级的权重为目标进行求解。以上两者均未考虑新调度方案与原有初始调度方案之间的变化情况。

李洪钧等<sup>[5]</sup>主要研究了新任务插入、资源变化

以及 2 种因素混合变化的 3 种扰动, 但未涉及具体方法的实现。刘洋等<sup>[6]</sup>主要考虑新任务到达的动态扰动因素, 以调度总优先级最高和原问题的解变化最小为求解目标, 采用一种启发式迭代修改方法求解; 而后在文献[7]考虑卫星资源的变化, 提出求解模型的启发式搜索方法。Zhuang S F 等<sup>[8]</sup>研究中继卫星动态调度问题, 主要考虑任务请求的变化, 包括任务数量、持续时间等, 以最大优先级总和与调度方案的更改最少为目标进行求解。刘晓路等<sup>[9]</sup>主要考虑新任务到达扰动, 以因新任务插入而删除的原规划方案的任务优先级之和最小来表示最小化扰动原规划方案。张彦等<sup>[10]</sup>以任务时间改变、任务执行约束改变、增加新任务 3 类扰动因素分别建立了中继卫星动态调度问题的动态约束满足模型, 设计了动态扩展/删除树搜索算法对模型进行求解。郑伟<sup>[11]</sup>以新增任务与资源故障为扰动因素, 以最大化调度任务优先级之和与最小初始方案的扰动变化为目标进行建模求解。以上动态模型建立过程中关注

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-02-26

基金项目: 复杂电子系统仿真重点实验室项目(DXZT-JC-ZZ-2019-010)

作者简介: 刘文文(1991—), 女, 山东人, 从事信息系统分析与集成研究。E-mail: 526255452@qq.com。

了新调度方案与原有初始调度方案之间的变化情况，目标以最小化初始方案扰动变化为主。

随着卫星通信事业的不断发展，通信卫星系统在语音通信、视频传输和互联网等业务传输服务的任务请求量急剧增加，通信卫星资源的动态调度方法更加灵活，更能适应调度场景的多元化，有效地提高了调度工作的效率。

## 1 通信卫星资源动态调度模型分析

### 1.1 扰动因素分析

通信卫星系统的动态扰动主要包括任务和资源 2 方面，具体扰动如图 1 所示。

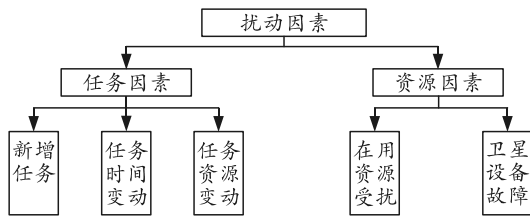


图 1 通信卫星资源调度动态扰动因素

#### 1.1.1 任务扰动因素

1) 任务时间、任务需求带宽、任务优先级改变。

任务时间、任务需求带宽的改变主要是任务与转发器之间可用资源和时间窗口约束的变化。

2) 新增任务。

增加新任务对原问题模型中任务集、占用时间约束、可用资源约束等约束集都会产生影响，造成约束集变动。

#### 1.1.2 资源扰动因素

在用资源受扰和卫星设备故障造成卫星资源集的变化，主要是卫星资源的可用时间、可用频率等的变动。

### 1.2 参数定义

为便于通信卫星资源动态调度问题的阐述，下面给出各项参数定义：

1) 初始调度方案信息。

初始调度方案的信息可由三元组表示： $PlanO = \{T_{orig}, S_{orig}, P_{orig}\}$ ，其中： $T_{orig}$  为初始问题任务信息； $S_{orig}$  为初始问题的卫星资源； $P_{orig}$  为初始问题的调度方案。任务  $i$  为  $T_{orig}_i = \{T_{D_i}, t_{b_i}, t_{e_i}, t_i, TF_i, b_i, p_i\}$ ， $0 \leq i \leq N$ ， $N$  为初始任务数量，资源为  $S_{orig} = \{F, fb, fe, B, Tb, Te, D\}$ 。

2) 变动任务信息。

任务变动集合为  $T_{new}$ ，记第  $j$  个任务为

$T_{new}_j = \{T_{D_j}, t_{b_j}, t_{e_j}, t_j, TF_j, b_j, p_j\}$ ， $0 \leq j \leq N_{new}$ ， $N_{new}$  为任务变动数量。具体说明见表 1。

表 1 任务需求主要参数符号说明

符号	释义	符号	释义
$T_D$	任务区域，可用经纬度表示	$t$	任务持续时长
$t_b$	任务的开始时间	$t_e$	任务结束时间
$TF$	任务工作频段	$b$	任务的带宽
$p$	任务优先级		

3) 变动后资源信息。

扰动因素导致卫星资源变动，最新资源集合为  $S_{new} = \{F_n, fb_n, fe_n, B_n, Tb_n, Te_n, D_n\}$ ，参数说明见表 2。

表 2 卫星资源主要参数符号说明

符号	释义	符号	释义
$F_n$	转发器的工作频段	$fb_n$	转发器起始频率
$fe_n$	转发器的终止频率	$B_n$	转发器的带宽
$Tb_n$	转发器可用起始时间	$Te_n$	转发器可用结束时间
$D_n$	转发器的覆盖区域，可用经纬度表示		

4) 变量定义。

决策变量集合定义为  $X$ ， $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ ， $x_i=1$  表示任务  $i$  可执行，分配资源； $x_i=0$  表示任务  $i$  不可执行，无资源。

### 1.3 约束描述

扰动后，新的任务集与资源集重新进行约束匹配：

1) 范围约束。

任务区域需在波束覆盖范围内，任务才能被执行，即

$$T_{D_j} \in D. \tag{1}$$

2) 时间约束。

任务的执行时间应在资源可用时间内，且对于资源的占用时间不能小于任务执行的持续时间，即

$$Tb_n \leq t_{b_j}, t_{e_j} \leq Te_n. \tag{2}$$

3) 频段约束。

工作频段相同时，卫星资源可为任务提供资源建立通信链路，提供通信服务，即

$$TF_j \in F_n. \tag{3}$$

4) 带宽约束。

卫星单个资源的带宽大于或等于任务需求带宽时，才能提供服务，即

$$b_j \leq B_n. \tag{4}$$

### 1.4 资源调度模型构建

动态调度方法求解主要采用动态约束满足模

型，而根据与初始调度方案之间的关系，可分为 2 种情况：

1) 初始调度方案不变。

出现动态扰动后，在新的时间节点上，根据当前条件对出现的扰动因素进行新的资源调度，并不变动初始调度方案，调度目标设为调度收益最大：

$$C_r = \max \sum_{i=1}^N x_i p_i^{-1} \quad (5)$$

其中： $N$  为任务的数量； $x_i$  为任务  $i$  的决策变量； $p_i^{-1}$  为任务优先级的倒数，用于表示任务的收益值<sup>[12]</sup>。

通信卫星资源调度可建模为如下数学模型：

$$\max \sum_{i=1}^N x_i p_i \quad (6)$$

$$\text{s.t. } T_{D_i} \in D \quad (7)$$

$$T_b \leq t b_i, t e_i \leq T_e \quad (8)$$

$$TF_i \in F \quad (9)$$

$$b_i \leq B \quad (10)$$

2) 考虑原有调度方案中任务资源的延续性。

在动态调度时，将初始调度方案中的任务与新申请任务统一进行调度。在某些任务中如果动态调度方案对初始方案进行大幅修改，将造成大量的时间和设备开销，并影响到用户的工作决策，造成较大损失。因此，规划新调度方案时，需考虑与初始调度方案的变更情况，保证新旧方案之间变化最小化，即初始方案中有尽可能多的任务沿用初始分配的资源。新调度方案与初始调度方案之间的变化程度，可表示为：

$$\varphi(f_0, f_n) = p_{nd} \quad (11)$$

其中： $f_0$  为原问题的解； $f_n$  为动态调度问题的解； $p_{nd}$  为  $f_0$  到  $f_n$  使用资源不变的任务数量。

建模为如下数学模型：

$$\max \sum_{i=1}^N x_i p_i \quad (12)$$

$$\max \varphi(f_0, f_n) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } T_{D_j} \in D \quad (13)$$

$$T b_n \leq t b_j, t e_j \leq T b_n \quad (14)$$

$$TF_j \in F_n \quad (15)$$

$$b_j \leq B_n \quad (16)$$

## 2 改进 NSGA-II 多目标优化算法

较多学者为提高 NSGA-II 算法的分布性、收敛

性和全局性，对其进行改进<sup>[13-15]</sup>。笔者结合通信卫星资源调度的特点，对 NSGA-II 算法<sup>[16]</sup>进行了适用性改进，一是对传统 NSGA-II 算法变异算子进行改进，提高算法的局部寻优和全局探索的能力；二是 NSGA-II 算法通常采用拥挤距离算子进行个体选择。但由于卫星资源调度中，某一任务可以在多个卫星资源上执行，导致任务可执行结果对应多个资源分配方案，使得种群多样性降低；因此，笔者采用基于参考点的非支配方法<sup>[17]</sup>提高种群的多样性。

改进 NSGA-II 多目标优化算法，具体过程如图 2 所示。

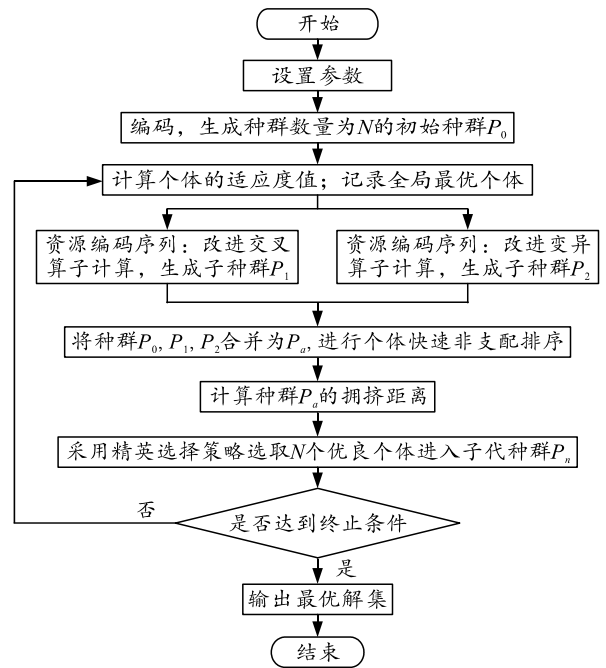


图 2 改进 NSGA-II 多目标优化算法流程

1) 编码和初始种群生成。

通信卫星资源调度包括 2 个过程：1) 任务与卫星的匹配，为任务分配不同的卫星，形成不同的卫星序列；2) 对分配至同一卫星的任务进行具体频率资源分配。如图 3 所示，笔者根据通信卫星资源调度的特点构建双基因序列：基因序列 1 为任务顺序，基因序列 2 为分配的资源序列，两者一一对应。

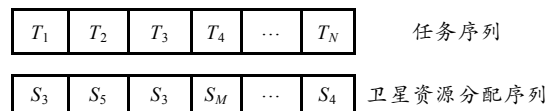


图 3 卫星资源分配序列

其中： $T_i$  就代表任务  $i$ ，形成任务编码序列  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_N\}$ ； $S_j$  代表卫星  $j$ ，形成卫星资源分配的编码序列  $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_M\}$ 。两者根

据顺序一一对应。

2) 适应度值。

个体适应度值的计算采用多目标权重加权的方式：

$$fit(i) = \sum_{k=1}^M ((f_i(k) - f_{\min}(k)) / f_{\min}(k)) \quad (17)$$

其中： $f_i(k)$ 为本种群第  $i$  个个体的第  $k$  个目标值； $f_{\min}(k)$ 为本种群中第  $k$  个目标的最小值； $M$  为目标数量。

3) 改进交叉算子。

笔者设计个体内部交叉和个体间交叉 2 种交叉算子，根据个体的适应度来自适应选择交叉算子。个体适应度值较高，说明个体性能较高，为保存个体内较好的基因序列，采用个体内部交叉算子；个体适应度值较低时，个体性能较差，为较大程度改变个体基因序列，采用个体间交叉算子。

个体内部交叉算子：在卫星资源编码序列父代个体  $p_1$  随机选取 2 个不同任务的资源进行交叉互换。

个体间交叉算子：在卫星资源编种群中选择 2 个父代个体，随机生成 2 个  $N_P$  以内整数作为交叉点，将 2 个父代交叉之间的部分进行互换。

4) 改进变异算子。

对卫星资源编码序列进行变异处理，传统 NSGA-II 算法的多项式变异方式具有较大的随机性，收敛速度较慢。笔者改进变异方式，变异公式为：

$$new\_s_{k,d} = \varphi w_1 s_{k,d} + w_2 (s_{k,d} - s_{e,d}) + w_3 (s_{best} - s_{k,d}) \quad k \neq e; \quad (18)$$

$$w_1 = fit_{S_k} / \sum_{i=1}^{N_p} fit_{S_i}; \quad (19)$$

$$w_2 = (fit_{S_k} - fit_{S_e}) / \sum_{i=1}^{N_p} fit_{S_i}; \quad (20)$$

$$w_3 = (fit_{S_{best}} - fit_{S_k}) / \sum_{i=1}^{N_p} fit_{S_i} \quad (21)$$

其中： $new\_s_{k,d}$  为新生成的个体； $s_{k,d}$  为当前选中个体； $s_{e,d}$  为随机选中个体； $s_{best}$  为当前种群中的最优个体。式(18)第 1 项中， $\varphi$  为由卡方分布函数产生的数列，在算法初期， $\varphi$  值较大，算法在  $s_{k,d}$  所在位置进行局部搜索，随着  $\varphi$  不断减小，算法后期  $s_{k,d}$  制约效果减弱，算法逐步开始全局搜索；第 2 项 ( $s_{k,d} - s_{e,d}$ ) 用于增加局部搜索的能力；第 3 项 ( $s_{best} - s_{k,d}$ )

侧重于增强全局搜索的能力。 $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  为权重因子，根据个体的适应度值进行计算， $fit$  为个体的适应度值。

5) 个体非支配排序。

采用 NSGA-II 算法中经典的快速非支配分层策略，根据个体的非劣解水平对种群分层，其作用是指引搜索向 Pareto 最优解集方向进行，是一个循环的适应值分级过程。计算种群  $P$  中的每个个体  $p_i$  的目标值，找出群体中非支配解集，记为第 1 非支配层  $F_1$ ，将其中个体赋予非支配序值  $L=1$ ，将被  $F_1$  支配的个体存入  $S_{F_1}$  中。然后在  $S_{F_1}$  继续找出群体中非支配解集，记为第二非支配排序层  $F_2$ ，个体赋予非支配序值  $L=2$ ；依次循环，直到整个种群分层结束，同一分层内的个体具有相同的非支配序值  $L$ 。

6) 基于参考点的选择。

在 NSGA-II 中融合 NSGA-III 基于参考点的算法，使用一组预定义的参考点以确保解的多样性。NSGA-II 设计参考点形成简单参考线，在种群目标值大量重复的情况下，相比于拥挤距离选择法，能有效地保持种群的多样性。参考点在一个  $(M-1)$  维的超平面上， $M$  是目标空间的维度，即优化目标的个数<sup>[18-20]</sup>。将每个目标划分为  $N$  份，其参考点的数量为：

$$P_n = \binom{M+N-1}{N} \quad (22)$$

针对每一个种群个体遍历所有参考点，找到距离每个种群个体最近的参考点。

7) 精英选择策略。

精选择英策略按 2 个目标值对由父代和子代组成的种群进行优选，以组成新的父代种群  $P+$ 。按照非支配序值  $L$  从低到高排序，将个体依次放入  $P+$ ，当放入某一层  $F_j$  时，出现  $P+$  中个体数量超过种群规模限制  $N$  的情况，则依据参考点的关联性，将联系少的参考点对应的个体保留，到种群数量达到  $N$  时终止。精英策略可保留父代中的优良个体直接进入子代，以防止获得的 Pareto 最优解丢失。

改进 NSGA-II 算法的伪代码如下。

Algorithm 1 Framework of the Proposed INSGA-II

Input: original plan PlanO, task set Tnew, Satellite resources set Snew, Satellite and mission matching set DS, population size, maximum generation Gen

Output: Optimal solution set

1: Initialize all parameters in INSGA

2:  $P_0 \leftarrow$  Initial population generation(, )

```

3: Solution0 ← Satellite and mission match
4: fit ← Calculate the fitness value of the initial population
individual()
5: G_best ← Update the best solution
6: for gen= 1 to GEN do
7:   foreach Crossover operator do//satellite
8:     If fit(i) ≤ fit_averag
       Outer crossover operator
     Else
       Internal crossover operator
     End
9:   end //Generate a new population(P1)
10:  foreach Crossover operator do// task
11:    Randomly select locations x and y to cross
Generate a new population(P2)
12:  end
13:  foreach Mutation operator do
14:    according to Equation (18) Generate a new
population(P3)
15:  end
16:  P ← merge P0, P1, P2, P3
17:  P' ← Non-dominated sorting
18:  P_D ← Reference point correlation calculation
19:  P_S ← Elite selection
20: end

```

### 3 实验仿真

#### 3.1 初始仿真场景

目前通信卫星资源调度真实的通信数据较难获

取，为验证笔者提出方法的有效性，通过 Matlab 与 STK 联合仿真进行数据模拟。初始调度场景如下：在 2021 年 5 月 14 日 0 时，进行卫星资源初始调度，卫星资源共 6 个，如表 3 所示；任务申请共 40 个，如表 4 所示。为体现资源调度解决任务之间矛盾的有效性，在设置任务需求申请时，增加了任务申请在时间和资源上的冲突。利用改进 ABC 算法对初始资源进行分配，以获取调度收益最大为目标，生成初始调度方案如图 4 所示，共执行任务 33 个，最终收益为 31.937。

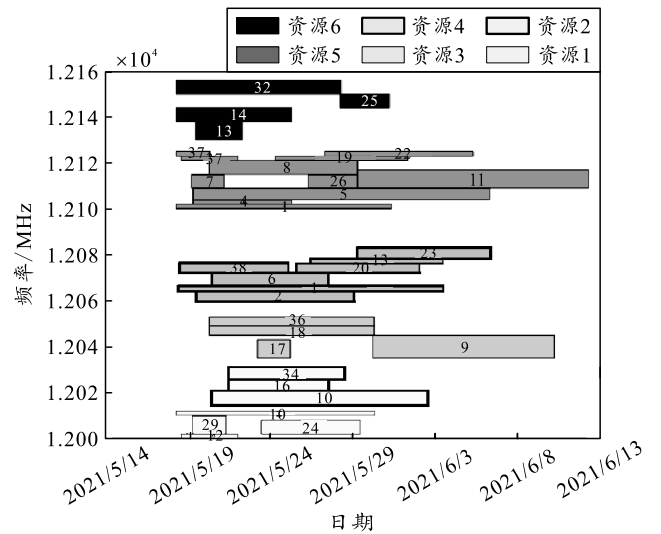


图 4 初始调度方案

表 3 静止轨道卫星通信资源

序号	星下点	频段	起始频率/MHz	结束频率/MHz	经度指向/(°)	纬度指向/(°)	半波束角/(°)
1			12 000	12 012	40	120	5
2	120°E	Ku	12 015	12 031	35	61	5
3	12 035		12 055	9	68	5	
4	12 060		12 090	17	90	5	
5	130°E	Ku	12 100	12 125	29	130	8
6	12 130		12 160	15	112	5	

表 4 通信任务

序号	带宽/MHz	优先级	频段	开始时间	结束时间	经度/(°)	纬度/(°)	半径/km
1	2	1	Ku	2021/5/18 8:00	2021/5/31 9:00	8	113.00	1 500
2	4	3	Ku	2021/5/29 2:00	2021/5/29 2:00	40	73.33	1 000
3	2	5	Ku	2021/5/18 12:00	2021/6/31 2:00	45	80.00	2 000
...								
40	4	5	Ku	2021/5/18 8:00	2021/5/30 8:00	31	80.00	1 500

#### 3.2 任务扰动的动态调度

在 2021 年 5 月 20 日 0 时，收到新增任务 40 个，具体信息如表 5 所示。此时初始调度方案的执

行情况如表 6 所示，需在此基础上进行动态资源调度。动态调度的过程中，为保证任务的连续性，初始方案中正在执行的任务不进行任务资源的调整。

表 5 通信任务

序号	带宽/MHz	优先级	频段	开始时刻	结束时刻	经度/(°)	纬度/(°)	半径/km
1	8	2	Ku	2021/5/18 6:00	2021/6/1 6:00	1	75	1 300
2	9	4	Ku	2021/5/22 12:00	2021/6/2 12:00	19	60	1 300
3	12	2	Ku	2021/5/22 8:00	2021/6/1 6:00	31	80	1 500
...								
40	5	4	Ku	2021/5/20 10:00	2021/5/30 8:00	30	120	1 000

表 6 初始调度方案的执行

任务	任务数量	任务收益
正在执行任务	15	15.634
未执行任务	18	16.655

3.2.1 初始方案不变的资源调度

初始方案任务的资源分配情况不变，利用空闲卫星资源为新申请任务进行资源分配。针对新增任务，以获取调度收益最大为目标，利用空闲资源进行分配，新规划方案可执行任务 15 个，获取的收益为 13.79，如图 5 所示，初始方案中未执行任务的收益为 16.655，则后续任务执行总数为 33，总收益为 30.34。

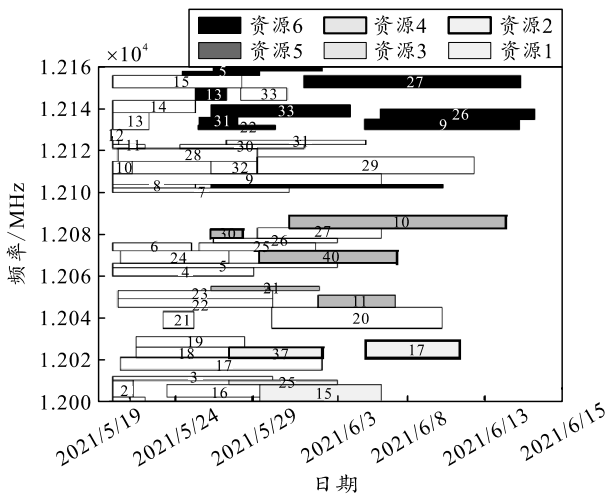


图 5 初始调度方案不变调度

3.2.2 动态多目标优化

采用笔者提出的动态调度方法，以任务调度收益最大化和初始调度方案资源未变动任务数量最大为目标，综合权衡考虑收益与初始任务调度变动之间的关系进行资源分配，在动态调度中，迭代次数设置为  $N_p=300$ ，种群数量为  $pop=50$ ，生成的 Pareto 最优解集如图 6，方案集整理为表 7。

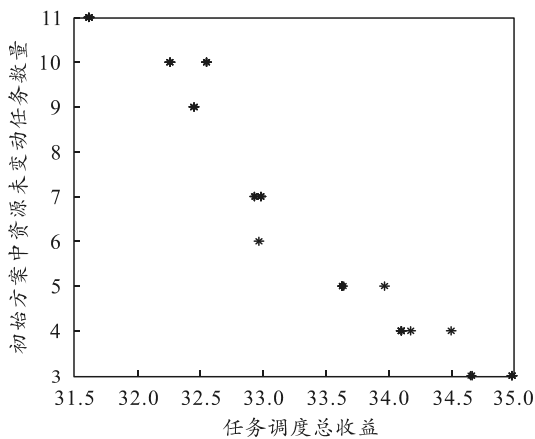


图 6 任务扰动调度 Pareto 前沿

表 7 调度方案集 1

方案种类	任务数量	可执行数量	调度收益	旧方案任务未变数量	方案数量
1	58	36	34.98	3	4
2	58	36	34.66	3	2
3	58	36	34.65	3	1
4	58	36	34.49	4	1
5	58	35	34.10	4	5
6	58	35	33.97	5	1
7	58	35	33.64	5	1
8	58	35	33.63	5	5
9	58	33	32.98	7	4
10	58	34	32.97	6	1
11	58	33	32.93	7	3
12	58	34	32.55	10	4
13	58	33	32.55	7	2
14	58	33	32.45	9	4
15	58	34	32.26	10	4
16	58	33	31.61	11	8

3.3 综合扰动的动态调度

在 2021 年 5 月 10 日 0 时，卫星资源 4 受扰，导致该资源无法使用，需将该资源上规划的任务进行调整，各卫星资源上任务分布数量如表 8。同时收到新增任务 40 项，具体信息如表 5。

表 8 初始调度方案任务分布

卫星资源	任务数量	卫星资源	任务数量
1	4	4	7
2	3	5	11
3	4	6	4

3.3.1 初始方案不变的资源调度

在初始方案任务资源不变动的情况下，以获取调度收益最大为目标，将受扰资源 4 上的任务与新增任务一同在调整后的资源上进行分配。新规划方案可执行任务 13 个，获取的收益为 11.864，如图 7 所示。初始方案中未执行任务的收益为 16.655，则后续任务执行总收益为 28.519。

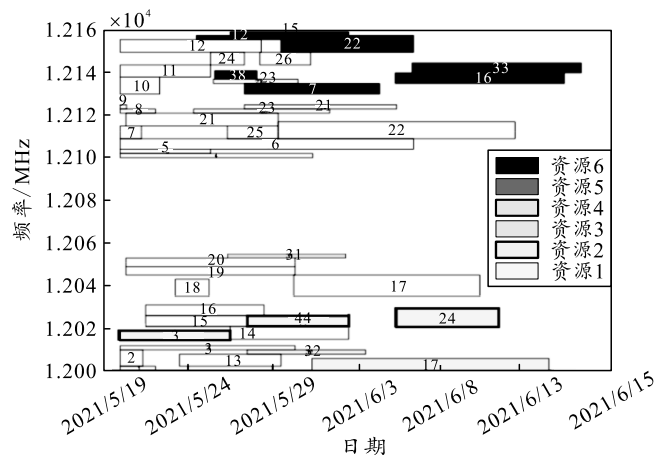


图 7 资源扰动动态调度方案

3.3.2 动态多目标优化

采用笔者提出的动态调度方法，以调度收益最大和旧任务调度之间变化最小为目标，综合权衡

考虑收益与初始任务调度变动之间的关系进行资源分配。在动态调度中，迭代次数设置为  $N_p=300$ ，种群数量为  $pop=50$ ，采用本文中改进 NSGA-II 算法，生成的 Pareto 最优解集如图 8，方案集整理为表 9。

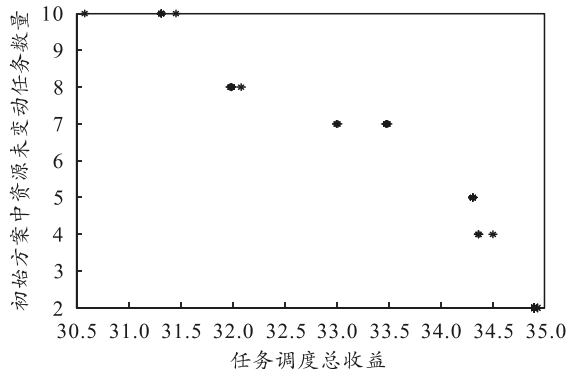


图 8 资源扰动调度 Pareto 前沿

表 9 调度方案集 2

方案种类	任务数量	可执行数量	调度收益	旧方案任务未变数量	方案数量
1	61	36	34.93	2	1
2	61	36	34.90	2	8
3	61	35	34.50	4	1
4	61	35	34.36	4	3
5	61	35	34.31	5	9
6	61	35	33.49	7	1
7	61	35	33.48	7	5
8	61	35	33.01	7	1
9	61	34	33.00	7	2
10	61	33	32.08	8	1
11	61	33	31.99	8	5
12	61	33	31.99	8	2
13	61	33	31.98	8	1
14	61	33	31.31	10	9
15	61	32	30.58	10	1

#### 4 结论

通过分析卫星资源和任务需求的特点，建立多目标通信卫星资源动态调度模型，结合对 NSGA-II 算法在变异算子和非支配选择方面的优化，通过仿真实验有效地验证了改进 NSGA-II 的通信卫星资源动态调度方法的可行性。

笔者在建立卫星资源调度模型时做了较多简化与假设，忽略了资源功率分配集卫星转发器的复杂化设置，在今后的研究中需提高调度模型与实际卫星资源调度的一致性。

#### 参考文献：

[1] 贺寅, 张海勇, 任重. 静止轨道卫星通信资源-任务匹配分析与建模研究[J]. 航天控制, 2014, 32(6): 44-49.  
 [2] 董彦磊. 卫星通信系统运行控制关键技术研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2018.  
 [3] 林宇生, 蒋洪磊, 董彦磊, 等. 基于遗传算法的通信卫星资源动态调度方法研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(6):

20-23.  
 [4] LI H J, LU Y, DONG F H, et al. Communications satellite multi-satellite multi-task scheduling[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 3143-3148.  
 [5] 李洪钧, 刘榕, 王健. 通信卫星动态调度问题研究[J]. 中国新通信, 2013, 15(11): 41-43.  
 [6] 刘洋, 贺仁杰, 陈英武. 基于动态约束满足的一类含时间窗口的多资源动态调度模型与方法: 中国运筹学会第七届学术交流会论文集(中卷)[C]. 北京: 中国运筹学会, 2004: 9.  
 [7] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 一类多卫星动态调度问题的建模与求解方法[J]. 系统仿真学报, 2004(12): 2696-2699, 2702.  
 [8] ZHUANG S F, YIN Z D, WU Z L, et al. The relay satellite scheduling based on artificial bee colony algorithm[C]. 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2014: 635-640.  
 [9] 刘晓路, 陈盈果, 李菊芳, 等. 基于 CHARTER 机制的减灾卫星调度问题研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(5): 166-172.  
 [10] 张彦, 孙占军, 李剑. 中继卫星动态调度问题研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1464-1468.  
 [11] 郑伟. 中继卫星动态任务规划模型与算法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.  
 [12] WU J, ZHANG J, YANG J, et al. Research on task priority model and algorithm for satellite scheduling problem[J]. IEEE Access, 2019, 7: 103031-103046.  
 [13] 郭一楠, 汤万宝, 陈国玉, 等. 动态多目标进化优化研究进展[J]. 信息与控制, 2021, 50(2): 162-173.  
 [14] 黄瀚, 张晓倩. 基于 NSGA2 算法的成像卫星星座多目标任务规划问题研究[J]. 软件导刊, 2016, 15(8): 143-146.  
 [15] 常辉, 胡修林. 基于改进的 NSGA-II 的卫星星座构型分层优化策略[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(1): 40-46.  
 [16] 王青松, 谢兴生, 周光临. 一种改进的非支配排序遗传算法[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(5): 28-32, 36.  
 [17] 耿焕同, 戴中斌, 王天雷, 等. 基于参考点选择策略的改进型 NSGA-III 算法[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(3): 191-201.  
 [18] 毕晓君, 王朝. 一种基于参考点约束支配的 NSGA-III 算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 369-376.  
 [19] TIAN Y, XIANG X, ZHANG X, et al. Sampling Reference Points on the Pareto Fronts of Benchmark Multi-Objective Optimization Problems[C]// 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2018.  
 [20] 庞善天, 陈基漓, 谢晓兰. 基于参考点拥挤度改进的 NSGA III 算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(6): 1626-1633.