

基于改进超启发算法的通信卫星任务松弛调度方法

刘文艺, 熊伟, 韩驰

引用本文

刘文艺, 熊伟, 韩驰. 基于改进超启发算法的通信卫星任务松弛调度方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 210900125-6.

LIU Wen-wen, XIONG Wei, HAN Chi. [Communication Satellite Task Relaxation Scheduling Method Based on Improved Hyper-heuristic Algorithm](#) [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 210900125-6.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于三支聚类的云任务优化调度](#)

Optimal Scheduling of Cloud Task Based on Three-way Clustering

计算机科学, 2022, 49(11A): 211100139-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211100139>

[减少Hadoop集群中网络队头阻塞的调度算法](#)

Reducing Head-of-Line Blocking on Network in Hadoop Clusters

计算机科学, 2022, 49(3): 11-22. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900117>

[基于机器学习的分布式星载RTs系统负载调度算法](#)

Load Scheduling Algorithm for Distributed On-board RTs System Based on Machine Learning

计算机科学, 2022, 49(2): 336-341. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201200126>

[空间众包任务的路径动态调度方法](#)

Dynamic Task Scheduling Method for Space Crowdsourcing

计算机科学, 2022, 49(2): 231-240. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400249>

[故障场景下的边缘计算DAG任务重调度方法](#)

Failure-resilient DAG Task Rescheduling in Edge Computing

计算机科学, 2021, 48(10): 334-342. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210300304>

基于改进超启发算法的通信卫星任务松弛调度方法

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 在卫星通信保障压力不断增加的背景下,需要不断提高通信卫星任务调度的效率。任务调度的矛盾主要集中在通信任务的申请时间和资源带宽的冲突上,文中通过松弛任务申请条件的方式,建立通信卫星任务调度的松弛模型,通过小幅度的时间和带宽调整来减少任务之间的冲突,增加任务获取卫星资源的可能性,提高任务的可执行率。在此基础上,提出一种基于人工蜂群的超启发算法对模型进行求解,该算法采用人工蜂群算法作为高层选择策略,并根据卫星资源调度问题的特点选择7种低层启发算子进行序列优化,同时采用模拟退火方式作为接受准则避免陷入局部最优。最后通过仿真实验及算法对比验证了提出的松弛模型和改进算法的有效性。

关键词:通信卫星;任务调度;改进超启发算法;松弛模型

中图分类号 TN927

Communication Satellite Task Relaxation Scheduling Method Based on Improved Hyper-heuristic Algorithm

LIU Wen-wen, XIONG Wei and HAN Chi

Complex Electronic System Simulation Laboratory, Space Engineering University Science and Technology, Beijing 101416, China

Abstract Under the background of increasing satellite communication support pressure, it is necessary to continuously improve the efficiency of communication satellite task scheduling. Task scheduling conflicts are mainly concentrated in communications task application time and bandwidth resource conflict, this article through the way of relaxation task application conditions, establish communication satellite relaxation model of task scheduling, with less time and bandwidth adjustment, reduce the conflicts between tasks, increase the likelihood of task for the satellite resources, improve the task can be enforced. On this basis, a super-heuristic algorithm based on artificial bee colony was proposed to solve the model. The artificial bee colony algorithm was used as the high-level selection strategy, and according to the characteristics of the satellite resource scheduling problem, seven low level heuristic operators are selected for sequence optimization, and simulated annealing is used as acceptance criterion to avoid falling into local optimum. Finally, the effectiveness of the proposed relaxation model and algorithm is verified by simulation experiment and improved algorithm comparison.

Keywords Communication satellite, Task scheduling, Improved hyper-heuristic algorithm, Slack model

1 概述

现有对通信卫星资源调度的研究,均以任务需求为固定输入条件进行资源的调度,为任务匹配满足任务时间、频段、带宽等需求的资源。Li等^[1]采用禁忌搜索算法解决多星多任务问题,禁忌搜索算法全局开发能力弱,易搜索到局部最优解;He等^[2]将蚁群算法引入卫星通信资源与任务匹配的问题中,提高了任务调度的综合收益,但是该算法的收敛速度慢,易陷入局部最优。以上研究的缺点是,在卫星资源分配的过程中,卫星资源若有一项不符合任务需求,则该资源不可用。严格的条件匹配可以为用户提供最满意的资源,但同时会因为苛刻的条件导致任务无法获取任何资源。Lin等^[3]利用遗传算法求解多任务单卫星资源调度问题,同时将任务时间设置为可变,以时间 t' 为步长调整任务开始时间的方式进行资源的

匹配,提高任务的可执行率,但步进的方式不易确定合适的步长,步进过大容易错失资源,步进过小则会增加算法的计算量。

通信卫星的资源调度不像侦察卫星^[4-5]、遥测卫星^[6]等卫星调度对时间匹配的准确度要求较高。通信卫星资源日常调度中,任务的申请时间以天计数,甚至以月计数,若在用户的可接受范围内对任务申请的条件进行适度的松弛性调整,可以增加任务获取到卫星资源的概率。任务时间、任务带宽这两个条件是任务之间冲突的主要矛盾,如果可以在用户的可接受范围内对任务的时间和带宽进行调整,则有助于提高任务的可执行率和资源的利用率。

本文从任务开始时间和任务带宽两个方面着手,增加其调整范围,建立松弛性调度模型,扩充了问题的求解空间,提高了任务获取资源的灵活性,并提出了一种基于人工蜂群的超启发算法(Hyper-Heuristic algorithm of Artificial Bee Co-

基金项目:复杂系统电子仿真重点实验室项目(DXZT-JC-ZZ-2019-010)

This work was supported by the Science and Technology Complex Electronic System Simulation Laboratory Project(DXZT-JC-ZZ-2019-010).

通信作者:刘文文(liuwenwen170@163.com)

lony)对模型进行求解,在保证任务可执行的前提下,增加了任务调度成功的数量和收益。

2 通信卫星资源调度问题描述

通信卫星资源调度可以描述为:根据任务的需求约束将卫星资源与任务进行匹配,将符合要求的资源分配给相应任务。在任务多,卫星资源少,无法满足所有任务申请的情况下,根据调度的目标进行卫星资源的有条件分配,最终满足调度要求。

2.1 卫星资源与任务需求

(1)通信卫星资源

多通信卫星资源集表示为 $S, S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}, S_i$ 是最小卫星资源块,可用一个多维变量表示, $S_i = \{F, fb, fe, B, Tb, Te, D\}$,参数说明如表 1 所列。

表 1 卫星资源主要参数符号说明

Table 1 Symbol description of main parameters of satellite resources

符号	释义	符号	释义
S	转发器资源	F	转发器的工作频段
fb	转发器起始频率	fe	转发器的终止频率
B	转发器的带宽	Tb	转发器可用起始时间
Te	转发器可用结束时间	D	转发器的覆盖区域,可用经纬度表示

(2)任务需求申请

在日常通信任务调度中,任务频段是由任务的组网终端设备可支持的频段所决定的,是不可更改的需求。任务的开始时间、结束时间及带宽需求并不是刚性的,相比不能获取任务资源,在用户可接受的范围内对其进行调整,从而增加任务获得资源的可能性,更加符合用户的需求。

任务需求申请主要包括使用频段、频段带宽、任务开始时间、任务结束时间、任务持续时长和任务区域,其是资源匹配的基本条件。为实现松弛调整,用户根据其可接受的调整程度,增加关于任务开始时间的时间调整范围 DT 和任务带宽的调整比率 DB 。其中, DT 是用户可以接受的开始时间提前或者延后的时长,以天为单位; DB 是带宽可调整的百分比。 T 为所有任务集, n 是任务总的数量, $T_i = \{T_{Di}, tb_i, te_i, t_i, TF_i, b_i, p_i, DT_i, DB_i\}, 1 \leq i \leq n$, 记为第 i 个任务,具体说明如表 2 所列。

表 2 任务需求主要参数符号说明

Table 2 Symbols of major parameters in task requirements

符号	释义	符号	释义
T	任务集合	T_i	第 i 个任务
T_{Di}	任务 i 的任务区域,可用经纬度表示	t_i	任务 i 的持续时长
tb_i	任务 i 的开始时间	te_i	任务 i 的结束时间
TF_i	任务 i 的工作频段	b_i	任务 i 的带宽
p_i	任务 i 的任务优先级	N	任务的总数量
DT_i	任务开始时间可调天数	DB_i	任务带宽可调比率

在任务需求与卫星资源匹配时,按照任务申请的时间和带宽要求与卫星资源进行匹配,若匹配成功,则该任务获取到资源,进行下一任务的分配,若所有资源均未匹配成功,首先进行任务开始时间的松弛匹配,若资源的开始时间 Tb_j 在任务开始时间的松弛范围内,即 $tb_i \leq Tb_j \leq tb_i + DT$,则两者的

时间差为 $\nabla t = Tb_j - tb_i$,资源与任务的结束时间满足 $te_i + \nabla t \leq Te_j$,则任务资源匹配成功,时间设置为 $tb_i = Tb_j, te_i = te_i + \nabla t$ 。否则进行任务结束时间松弛匹配,若资源的结束时间 Te_j 在任务结束时间的松弛范围内,即 $te_i - DT \leq Te_j \leq te_i$,则两者的时间差为 $\nabla t = tb_i - Tb_j$,资源与任务的开始时间满足 $Te_j \leq te_i - \nabla t$,则任务资源匹配成功,时间设置为 $tb_i = tb_i - \nabla t, te_i = Te_j$ 。否则进行任务带宽的松弛匹配,若资源的带宽大小在任务带宽松弛范围内,即 $b_i * DB_i \leq B_j$,则任务带宽设置为 $b_i = B_j$,任务资源匹配成功,否则该任务资源匹配失败,进行下一任务的资源匹配,具体分配过程如图 1 所示。

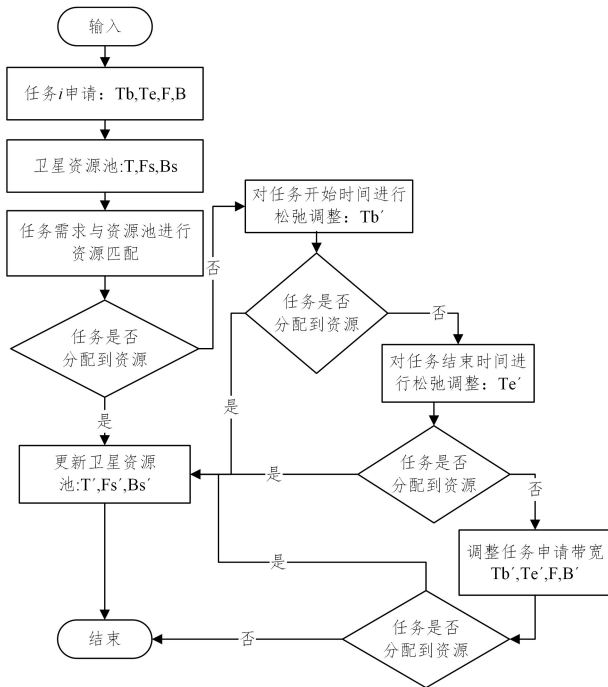


图 1 任务需求与卫星资源的匹配过程

Fig. 1 Task requirements and satellite resource matching process

2.2 资源调度模型构建

(1)调度目标

日常通信保障中,除特殊任务优先级较高,需重点保障外,大多数任务为普通任务,优先级基本相同且较低,因此日常通信资源调度常以提高调度收益和增加任务调度数量为主,故调度的目标设置为任务调度总收益最大和任务执行数量最多的加权求和。

任务调度总收益最大化:

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

其中, n 为任务总数量, x_i 是任务 i 的决策变量, $x_i = 1$ 表示任务 i 获取资源,可执行, $x_i = 0$ 表示任务 i 未获取资源,不可执行, p_i^{-1} 为任务的收益值,用任务优先级的倒数表示。

任务执行数量最多:

$$C_l = \max \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

其中, n 是任务总数量, x_i 是任务 i 的决策变量。

调度目标为:

$$C = \alpha C_r + \beta C_l \quad (3)$$

其中, α 和 β 是目标函数的权重, $\alpha + \beta = 1$,一般设置为 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

(2)约束条件

1)范围约束。任务过程中的活动范围需在波束覆盖区域内,任务终端才能建立通信链路,即:

$$T_{Di} \in D \tag{4}$$

2)时间约束。对任务时间进行松弛调整后,任务分配的资源调度时间需覆盖任务的开始时间和结束时间,且对资源的占用时长不能小于任务的持续时间,任务执行时间需连续,即:

$$(T_b \leq t_{b_i} + DT_i, t_{e_i} - DT_i \leq T_e) \cup (t_{e_i} - t_{e_i} \leq T_e - T_b) \tag{5}$$

3)频段约束。任务终端和卫星资源处于同工作频段,卫星才能与终端之间建立通信链路,提供通信服务,这是通信建立的硬约束,即:

$$TF_i \in F \tag{6}$$

4)带宽约束。卫星转发器资源带宽需大于任务需求带宽,且频率要连续可用才能提供服务,即:

$$b_i * DB_i \leq B \tag{7}$$

(3)通信卫星资源调度模型

建立通信卫星资源调度模型:

$$C = \alpha C_r + \beta C_l \tag{8}$$

$$s. t. T_{Di} \in D \tag{9}$$

$$(T_b \leq t_{b_i} + DT_i, t_{e_i} - DT_i \leq T_e) \cup (t_{e_i} - t_{e_i} \leq T_e - T_b) \tag{10}$$

$$TF_i \in F \tag{11}$$

$$b_i * DB_i \leq B \tag{12}$$

式(8)中,将 α, β 均设置为0.5。约束(9)用于描述任务区域必须在转发器覆盖范围内。约束(10)用于描述任务的调整后执行时间必须在转发器可用时间范围内。约束(11)用于描述任务所需频段必须与转发器频段一致。约束(12)用于描述任务调整后的带宽必须小于或者等于转发器的带宽。

3 基于人工蜂群的超启发式算法研究

3.1 超启发算法

超启发式算法^[7]是新近提出的一类解决复杂优化问题的概念模型。超启发式算法的框架分为两个层面,如图2所示。

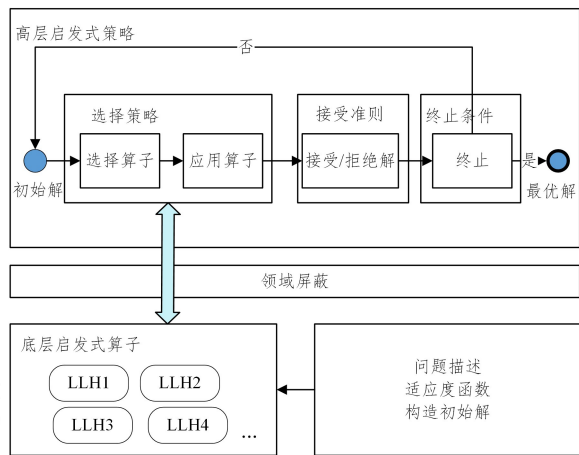


图2 超启发算法框架

Fig.2 Superheuristic algorithm framework

底层为问题域,根据具体问题的性质,设计了一系列的底层启发式算子(即LLH),组成底层启发式算子集,并提供

问题定义、问题表示、初始解、评估函数等信息;高层为控制域,设计高层的启发式策略,形成对底层启发式算子的管理操纵机制。在每一个决策点,运用底层启发算子集和问题特征信息,选择已有的或构造出新的启发式算法,用于具体问题的求解,按照一定的接受准则进行选择。根据文献[8-9]的研究,由于高低两个层面之间实现了领域信息的屏蔽,高层的启发式算法对问题模型、初始解、适应度函数等信息并不敏感,使算法具有较高的适应性和鲁棒性。

3.2 问题域

问题域主要包括两部分:1)与具体问题紧密相关的内容,如问题描述、适应度函数设计、问题初始解构造等;2)底层启发式算子构造。

第一部分的问题描述、适应度函数设计、问题初始解构造主要的工作是问题编码、初始解构造和适应度函数设计。

任务与卫星资源分别进行编码和初始解构造: N 个任务按照一定规则排序后,编号为 $1, 2, 3, 4, \dots, N$,形成初始任务的编码序列 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_N\}$, T_i 代表任务 i 。 M 个卫星资源数量按照一定规则排序后,编号为 $S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_M$, S_j 代表卫星资源 j ,为每个任务随机分配卫星资源,按照任务序列形成卫星资源分配的编码序列 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_M\}$,如图3所示。按照编码方式随机生成 N_p 个个体,形成初始种群。

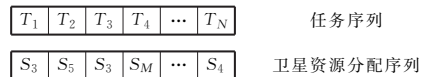


图3 卫星调度编码

Fig.3 Satellite scheduling code

适应度函数设计:以目标函数值作为个体的适应度值,故适应度值函数与式(3)相同,为:

$$F = \alpha C_r + \beta C_l \tag{13}$$

第二部分构造低层启发式算子。低层启发式算子通过高层控制策略形成算子序列,直接作用于通信卫星资源调度问题,用于解空间的搜索^[10]。低层启发式算子过于复杂会影响算法的运行效率,同时通信卫星资源调度为整数编码的方式,因此选择使用简单的交叉、变异算子作为低层启发式算子。由于问题是双链编码,因此需要分别根据任务序列和资源序列的特点设计低层启发式算子。本文共设计了7个低层启发式算子,其中作用于任务链的有3个,作用于资源链的有4个。

针对任务链,由于同一任务只能分配一次资源,任务链中的任务不可重复出现,因此任务链主要以交叉算子为主。

算子LLH1:单个个体随机交叉操作,从某一任务序列中随机选取两位进行交换。

算子LLH2:前项插入操作,随机从某一任务序列中选择两个位置,将靠后位置的资源插入到靠前位置之前。

算子LLH3:逆序操作,从某一任务序列中随机选择3到4位连续的子序列,将它们逆序排列。

针对资源链,同一资源可以支撑多个任务,资源可以重复出现,因此资源链采用非交叉和变异算子。

算子LLH4:单个个体随机交叉操作,从某一卫星资源序列中随机选取两位进行交换。

算子 LLH5: 变异操作, 从某一卫星资源序列中随机选择 1 个位置, 将其随机置换为其他卫星资源。

算子 LLH6: 相邻交叉操作, 在卫星资源序列中随机选择一个位置, 将它前一个或后一个资源与它交换。

算子 LLH7: 截取操作, 从某一卫星资源序列中随机选择 1 到 5 位连续的子序列, 将它们插入到序列首端。

3.3 高层启发式策略

3.3.1 选择策略

人工蜂群算法^[11-12]具有控制参数少、易于实现、计算方便等优点。本文设计了人工蜂群选择机制作为超启发算法的高层选择策略, 提出了基于人工蜂群的超启发算法, 利用人工蜂群的选择机制操纵和管理底层启发算子, 对底层启发算子组成的空间进行搜索。人工蜂群种群的单个个体长度为底层启发算子的数量, 个体随机生成, 且底层启发式算子可以重复出现, 如图 4 所示。

2	4	3	4	7	2	5
LLH2	LLH4	LLH3	LLH4	LLH7	LLH2	LLH5

图 4 人工蜂群算法的编码

Fig. 4 Coding of artificial bee colony algorithm

按照蜂群个体的顺序从左至右将底层算子依次应用到底层编码序列中, 每执行一个算子, 就计算新底层编码序列的解, 并将新解与旧解进行对比, 若新解的适应度值高于旧解的适应度值, 则新解代替旧解, 该个体中剩余的底层算子不再执行。

在人工蜂群算法中, 蜜蜂扮演了 3 种角色, 即引领蜂 (Leader)、跟随蜂 (Follower) 和侦察蜂 (Scouter), 3 种角色按照不同的搜索策略进行蜜源的搜索^[13]。蜜源的位置对应的是优化问题的可行解, 而蜜源的质量代表了可行解的质量。引领蜂在算法初始对问题的解空间进行了全局随机搜索, 搜索后会计算可行解的质量 F , 然后将蜜源的信息与跟随蜂分享, 跟随蜂则以一定的转移概率 P_k 选择引领蜂跟随, 对蜜源进行搜索。若一个蜜源在经过规定次数后仍未被更新优化, 则此引领蜂变成侦察蜂, 侦察蜂寻找新的解来代替原来的解。

(1) 引领蜂搜索策略

初始蜜源产生后, 每个蜜源匹配一个引领蜂, 引领蜂在蜜源附近进行邻域搜索, 搜索到新的蜜源后将其应用于底层启发式算子, 计算其适应度值, 与原蜜源的适应度值进行比较, 如果新蜜源的适应度值高于原蜜源, 则引领蜂用新蜜源代替原蜜源。引领蜂的搜索公式为:

$$new_s_{k,d} = \varphi \omega_1 s_{k,d} + \omega_2 (s_{k,d} - s_{e,d}) + \omega_3 (s_{best} - s_{k,d}), k \neq e \quad (14)$$

$$\omega_1 = fc_{S_k} / \sum_{i=1}^{N_p} fc_{S_i} \quad (15)$$

$$\omega_2 = (fc_{S_k} - fc_{S_e}) / \sum_{i=1}^{N_p} fc_{S_i} \quad (16)$$

$$\omega_3 = (fc_{S_{best}} - fc_{S_k}) / \sum_{i=1}^{N_p} fc_{S_i} \quad (17)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权重因子, φ 是由卡方分布函数产生的数列, 取值范围为 $(0, 1]$ 。卡方分布函数是减函数, 在算法初期, φ 取较大值, 使得 $\omega_1 s_{k,d}$ 的作用效果明显, 侧重于局部最优搜索; 迭代次数逐渐增加, φ 不断减小, 算法后期 $\omega_1 s_{k,d}$ 的作用

效果减弱, 侧重于全局最优搜索。同时, 卡方分布函数也是凹函数, 在算法初期递减速度快, 尤其是在迭代次数较多时, 可增加局部最优解的搜索速度, 算法后期递减速度降低, 有利于更加充分地搜索全局最优解。 $s_{e,d}$ 是随机选择的第 e 个个体, 因此式 (14) 中第二项侧重于增加算法局部最优搜索的能力; s_{best} 是当前种群的最优个体, 因此式 (14) 中第三项侧重于增强算法全局最优搜索的能力。其中, fc 是任务调度收益的归一化值。

(2) 跟随蜂选择策略

跟随蜂采用轮盘赌策略选择引领蜂提供的蜜源, 并在选择蜜源的基础上, 按照式 (18) 进行搜索:

$$new_s_{k,d} = \omega_1 s_{k,d} + \omega_2 (s_{k,d} - s_{e,d}), k \neq e \quad (18)$$

(3) 侦察蜂侦察策略

在搜索过程中, 记录每个蜜源未改进的次数, 当某一蜜源尝试 LIT 次后, 解的质量仍未提高, 则放弃该解, 引领蜂变为侦察蜂, 采用随机生成的方式产生新的蜜源。

3.3.2 接受准则

接受准则指根据高层策略操作底层启发式算子对问题进行搜索, 在获取到新子代个体后, 用于判断子代个体是否能够代替父代个体。本文采用模拟退火方式建立接受准则。初始温度设置为 T , 降温系数设置为 r , 退火温度设置为 $T = T \times r$, 在每次迭代后更新。具体接受准则为: 使用高层策略操作底层算子搜索到新的子代个体后, 计算新个体的适应度值, 若适应度值提高, 则接受新个体; 若新个体未改进, 则以概率 $p = e^{\Delta/T}$ 接受新个体。

3.4 算法流程

基于人工蜂群的超启发算法 (Super-heuristic Algorithm of Artificial Bee Colony, HHABC) 求解通信卫星资源调度问题的步骤可以具体描述为:

步骤 1 初始化。问题中有 N 个任务、 M 个资源, 首先初始化底层问题域种群, 生成长度为 N 的任务-资源双序列个体, 种群数量为 Np 。同时, 初始化高层策略域种群, 设置底层启发式算子数量为 7, 则生成长度为 7 的蜂群个体, 种群数量为 Np 。

步骤 2 计算适应度值。用高层种群个体对应底层种群个体进行操作, 保存新的低层种群个体, 并计算新低层个体的适应度值, 同时也使其对应高层个体的适应度值。

步骤 3 根据人工蜂群的搜索策略式 (14) 和式 (18), 蜜蜂搜索新的蜜源, 对蜂群种群个体进行更新。将新的高层种群个体操作底层算子依次作用于底层种群个体, 每个算子作用后求解新适应度值, 若新个体的适应度值优于旧个体, 则替换旧个体, 并不再使用后续底层启发式算子进行搜索, 否则根据当前温度以一定概率接受差解。

步骤 4 保存最优解。分别对两个域中种群的最优个体进行保优操作, 将每个域的精英解放入对应种群。

步骤 5 根据降温系数降温, 并判断迭代次数是否达到总代数, 若没有则转到步骤 3, 否则终止循环。

3.5 算法时间复杂度

本文中目标函数数量为 K , 任务数量为 N , 低层算子数量为 L , 资源数量为 M , HHABC 算法的时间复杂度分析如表 3 所列。因此, HHABC 算法的时间复杂度 $T(N_p) = 2L \times N_p^2 +$

$L \times N_p + N \times N_p + N_p$, 其时间复杂度为 $O(L \times N_p^2)$ 。

表3 HHABC算法的时间复杂度

Table 3 Time complexity of HHABC algorithm

步骤	时间	时间复杂度
初始化	$N \times N_p + L \times N_p$	$O(N \times N_p)$
计算适应度值	N_p	$O(N_p)$
跟随蜂搜索蜜源	$L \times N_p^2$	$O(L \times N_p^2)$
侦察蜂搜索蜜源	$L \times N_p^2$	$O(L \times N_p^2)$

4 实验仿真

4.1 仿真场景

目前通信卫星资源调度还没有公认的测试问题集,为验证本文方法的有效性,通过 MATLAB 与 STK 联合仿真进行数据模拟。调度场景如下:在 2021 年 7 月 25 日 00 时,卫星资源共 4 个,如表 4 所列,收到任务申请共 40 个,如表 5 所列。

表4 静止轨道卫星通信资源

Table 4 Geostationary satellite communication resources

序号	星下点/ (°E)	频段	起始频率/ MHz	结束频率/ MHz	经度指向/ (°N)	纬度指向/ (°E)	半波束角/ (°)
1			12000	12020	40	120	5
2	120	Ku	12015	12040	35	61	5
3			12042	12072	9	68	5
4			12075	12105	17	90	5
5	130	Ku	12107	12145	29	130	8
6			12147	12187	15	112	5

表6 场景仿真计算结果

Table 6 Simulation results of scenarios

	运行 1	运行 2	运行 3	运行 4	运行 5	运行 6	运行 7	运行 8	运行 9	运行 10	平均值
常规模型	21.013	21.013	20.979	21.121	20.983	20.843	21.361	21.312	21.057	21.020	21.070
	32	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32.9
弹性调整模型	23.097	23.625	23.174	22.927	23.197	23.009	23.108	23.258	23.257	22.958	23.161
	36	37	36	36	36	36	36	37	37	36	36.3

(2)算法改进的对比

为了测试提出的 HHABC 算法的性能,与 IABC^[14]、IGA^[15]算法进行对比实验。任务数量增加至 50 个,任务申请如表 7 所列。

表7 通信任务集 2

Table 7 Communication task set 2

序号	带宽/ MHz	优先级	开始时间	结束时间	时间 调整	带宽 调整
task1	10	5	2021/8/17 8:00	2021/8/26 8:00	1	0.8
task2	10	2	2021/8/17 6:00	2021/8/25 6:00	1	0.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
task50	8	4	2021/7/27 8:00	2021/8/6 8:00	3	0.9

表8 场景仿真计算结果

Table 8 Simulation results of scenarios

	运行 1	运行 2	运行 3	运行 4	运行 5	运行 6	运行 7	运行 8	运行 9	运行 10	平均值
HHABC	25.400	25.51	25.388	25.874	25.395	25.079	25.622	25.707	25.407	25.930	25.531
	39	39	40	40	39	40	39	40	39	41	39.6
IGA	23.865	23.666	24.007	24.121	23.912	23.863	23.454	24.302	23.656	23.685	23.853
	38	37	37	37	37	38	38	39	38	37	37.6
IABC	23.674	24.059	23.987	23.896	23.532	23.722	23.939	24.145	23.701	24.097	23.875
	36	38	38	37	36	37	38	38	37	37	37.2

表5 通信任务集 1

Table 5 Communication task set 1

序号	带宽/ MHz	优先级	开始时间	结束时间	时间 调整	带宽 调整
task1	10	5	2021/8/17 8:00	2021/8/26 8:00	1	0.8
task2	10	2	2021/8/17 6:00	2021/8/25 6:00	1	0.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Task40	10	2	2021/8/2 8:00	2021/8/8 8:00	1	0.9

4.2 实验结果及分析

(1)模型改进的实验对比

将本文提出的松弛调整资源调度模型与常规模型分别用 HHABC 算法进行求解。算法迭代次数均设置为 $M_c = 100$, 种群数量为 $N_p = 50$ 。为消除随机性的影响,两种模型分别运行 10 次,以均值体现模型的求解性能,对数据进行分析,结果如表 6 所列。以常规模型对问题进行求解,获得的平均收益值为 21.07,可执行任务约为 33 个。以松弛调整模型进行求解,获得的平均收益值为 23.16,可执行任务约为 36 个,比常规模型的收益值提高了约 10%,可调度任务数量增加了 3 个左右,因此在用户可接受的范围内,对用户申请的资源使用时间和资源带宽做出调整,可以有效地提高资源调度的收益及分配任务的数量。

HHABC 算法的迭代次数均设置为 $M_c = 100$, 种群数量为 $pop = 50$, ABC、IGA 算法的迭代次数均设置为 $M_c = 300$, 种群数量为 $pop = 50$, 其中遗传算法的交叉概率为 $\mu = 0.8$, 变异概率为 $\nu = 0.2$ 。为消除随机性的影响,3 种算法分别运行 10 次,以均值体现算法的求解性能,对数据进行分析,结果如表 8 所列。IGA 算法求解均值为 23.853,最优解为 24.302,最差解为 23.454; IABC 算法求解均值为 23.875,最优解为 24.145,最差解为 23.532; HHABC 算法求解均值为 25.531,最优解为 25.930,最差解为 25.079,求解目标均值比 IGA 提高了 7.04%,比 IABC 提高了 6.94%。且由图 5 可以看出,10 次运行中,HHABC 每次的运行结果均优于 IGA 和 IABC。

以第五次运算结果为例,HHABC 算法的寻优过程如图 6 所示,其在迭代过程中能很好地跳出局部优化,进而进行全局搜索。最终资源分配结果如图 7 所示。

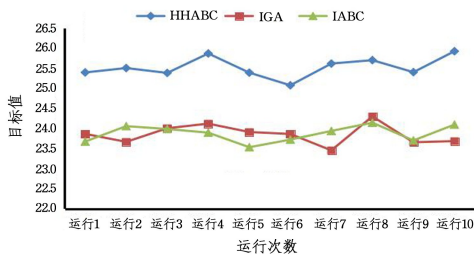


图5 算法运行结果对比图

Fig. 5 Comparison of algorithm running results

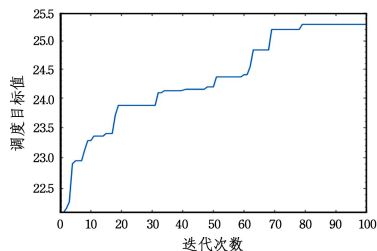


图6 人工蜂群算法的编码

Fig. 6 Coding of artificial bee colony algorithm

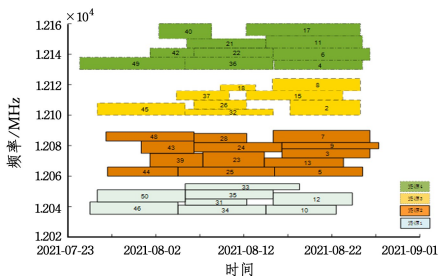


图7 人工蜂群算法的编码

Fig. 7 Coding of artificial bee colony algorithm

以任务 22 为例,任务 22 的申请需求为:开始时间为 2021 年 8 月 7 日 8:00,结束时间为 2021 年 8 月 16 日 8:00,持续时长 9 天,需求带宽为 6MHz,时间可调整天数为 2,带宽可调整比率为 10%。最终资源分配结果为:任务 22 开始时间为 2021 年 8 月 6 日 8:00,结束时间为 2021 年 8 月 15 日 8:00,持续时长 9 天,起始频率为 12138 MHz,终止频率为 12144 MHz,提供带宽 6 MHz。在分配结果中,对任务 22 的开始时间进行了调整,提前一天时间,以满足用户需求。

结束语 针对通信卫星资源调度问题,本文提出了资源松弛调度模型,通过松弛任务申请时间和资源带宽的要求,能够有效缓解任务之间的冲突,避免碰撞,增加任务获取资源的可能性。本文提出了基于人工蜂群的超启发算法来求解资源调度问题,在超启发算法的高层策略中引入人工蜂群算法,对低层算子进行调度,并针对通信卫星资源调度问题构建双层低层算子,通过对任务序列和资源序列的组合探索,来完成对解空间的全局搜索,在实例求解中,该方法有效提高了资源调度的收益,增加了任务可执行的数量。

基于人工蜂群的超启发算法提升了资源调度的求解结果,但也存在运行时间较长的问题,具有较大的改进空间,之后需要对优化算法进行研究,提高算法性能。

参考文献

[1] LI H J, LIU R, HAN F C. Research on Task Scheduling Based

on Communication Satellite Resources[C]//The 9th China Satellite Communication Broadcasting and Television Technology International Conference and New Equipment Exhibition, 2011.

[2] HE Y, ZHANG H Y, ZHONG R. Research on GEO Satellite Communication Resource-Task Analysis and Modeling Match [J]. Aerospace Control, 2014, 32(6): 44-49, 56.

[3] LIN Y S, JIANG H L, DONG Y L, et al. Research of Dynamic Scheduling Method of Communication Satellite Resources Based on Genetic Algorithm[J]. Radio Engineering, 2017, 47(6): 20-23.

[4] HE C, QIU D C, ZHU X M, et al. Emergency scheduling method of imaging reconnaissance satellite based on rolling optimization strategy [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2013, 33(10): 2685-2694.

[5] QIAO L F, ZHAO X G. Research on mission planning of reconnaissance satellite based on multistage decision [J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2014, 30(6): 30-34.

[6] GONG J L, JIANG W T, HAN X D. Research on telemetry data scheduling strategy of communication satellite based on priority [J]. Telemetry and Remote Control, 2017, 38(1): 41-46.

[7] XU C. Research on super heuristic algorithm and its application in low carbon LRP [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.

[8] QIAN B, SHE M Z, HU R, et al. Super heuristic cross entropy algorithm for fuzzy distributed pipeline green scheduling problem [J]. Control and Decision Making, 2021, 36(6): 1387-1396.

[9] HIDAYATUL Y T S, DJUNAIDY A, MUKLASON A. Solving multi-objective vehicle routing problem using hyper-heuristic method by considering balance of route distances[C]//2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT). IEEE, 2019: 937-942.

[10] LI S H, HU R, QIAN B, et al. Super-heuristic genetic algorithm for fuzzy flexible job-shop scheduling [J]. Control theory & applications, 2020, 37(2): 316-330.

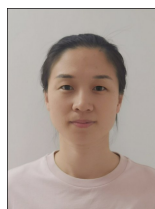
[11] HE Y, LIU J H, YANG R H. Review of artificial bee colony algorithm [J]. Computer Application Research, 2018, 35(5): 1281-1286.

[12] XIAO Y, CHEN D, ZHANG L Y. Research on spectrum scheduling based on discrete artificial bee colony algorithm[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1856(1): 012059.

[13] DU X Y, DU C L, LIU Y F, et al. Research on Load Balancing of Avionics System Based on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. Avionics Technology, 2021, 52(1): 27-31.

[14] ZHENG X C, GONG W Y. Improved artificial bee colony algorithm for fuzzy flexible job-shop scheduling problem [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(6): 1284-1292.

[15] CHEN J G, MA L Y, MA L L. Improved Genetic Algorithm for Job-shop Scheduling Problem [J]. Applications of Computer Systems, 2011, 30(5): 190-195.



LIU Wen-wen, born in 1991, postgraduate. Her main research interests include information system analysis and integration, communication satellite resource scheduling.