

基于随机搜索策略的中继卫星调度方法*

姚 锋¹, 罗启章², 朱燕麒¹, 陈盈果¹

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:高质量的调度方案不仅能满足用户的需求,还能为中继卫星系统的计划编制提供科学的决策手段和依据。针对日益多样化的用户需求,采用全新的中继卫星调度应用模式,允许用户提交多个可以滑动的时间窗口。面向这种调度模式,考虑中继业务中任务调度的灵活性和任务间的冲突,构建考虑多滑动窗口的中继卫星调度模型,并设计基于随机搜索策略的中继卫星调度算法。算法包括任务资源匹配与邻域生成、可用时间段生成、任务冲突分析、邻域搜索与冲突消解以及资源与任务集更新5个算子。通过仿真实验将该算法与基于时间自由度的启发式算法进行对比,验证了算法的有效性。

关键词:跟踪与数据;中继卫星;调度;冲突消解;随机搜索

中图分类号:V19;TP278 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)05-136-07

Scheduling method for tracking and data relay satellites based on stochastic search strategy

YAO Feng¹, LUO Qizhang², ZHU Yanqi¹, CHEN Yingguo¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A high-quality scheduling scheme can not only satisfy users' demands but also provide a basis for scientific decision-making of tracking and data relay satellites system. Aiming at the increasingly diversified users' demands, a novel application paradigm for tracking and data relay satellites system, in which users can submit multiple service time windows that can slide within a certain period, was adopted. To handle this application paradigm, by considering the flexibility of task scheduling and the conflicts among tasks, a mathematical programming model for relay satellite schedule was developed and a scheduling algorithm based on stochastic search strategy was designed. The proposed algorithm includes five operators, i. e., resource matching and neighborhood construction, actual service time windows generation, conflict evaluation, local search and conflict resolution, and solution update. The proposed algorithm was verified by comparing with the heuristic algorithm based on time freedom degree according to extensive simulation experiments.

Keywords: tracking and data relay satellite; scheduling; conflict resolution; stochastic search

中继卫星能够为中、低轨道的航天器提供数据中继、连续跟踪与轨道测控等服务^[1-2]。通过少量中继卫星组网,可实现对轨道高度在200~12 000 km范围内所有航天器的连续跟踪与数据中继,减少地面测控站和测量船、测量飞机的数量,节省远程通信费用及人工维护费用,打破国土面积以及地理因素的限制,使得对用户航天器进行连续通信成为可能^[3]。因此,中继卫星逐渐成为各国发展航天事业越来越重要的项目。

随着我国航天器和海外任务数量的增加,中继任务需求与日俱增,用户规模日益庞大,对中继卫星的调度能力和水平提出了更高的要求^[4]。有必要结合实际应用情况,采用更加灵活的中继

卫星调度应用模式,并设计相应的数学模型和求解算法,为用户提供更高质量的调度服务。

目前,针对中继卫星应用模式的研究和创新不多,在相关文献中较少明确介绍中继卫星应用模式,也较少对其进行设计和创新。现有研究主要基于较为通用的应用模式展开^[5-6],即用户基于任务需求申请一个确定的时间窗口,每项任务对应一个时间窗口,并指定一个需要服务的中继卫星天线。然而,传统的应用模式主要存在以下问题:第一,用户的任务需求情况复杂多样,有的任务有多个备选服务时间窗口,有的任务需要指定中继卫星天线,有的任务则不需要指定,单个服务时间窗口难以满足用户需求。第二,用户在申

* 收稿日期:2020-01-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71701203,71701204)
作者简介:姚锋(1978—),男,陕西咸阳人,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:yaofeng@nudt.edu.cn

请时通常难以提供准确的服务时间窗信息,为了保证数据有足够时间下传,往往会申请一个比自身需求大很多的时间窗口,导致天线与窗口资源的浪费。第三,由于每项任务只允许申请一个时间窗口,如果无法满足该时间窗口,则该任务将无法成功调度。因此,本文提出了一种全新的中继卫星用户申请的应用模式,允许用户针对每项任务提交多个可以滑动的服务时间窗口,并在每个服务窗口指定偏好的中继卫星天线,从而提高调度的灵活性和合理性,满足用户的多样化需求。

高质量的调度算法对提高中继卫星资源的服务水平具有重要意义。中继卫星调度问题由于其复杂性和多约束的特点而难于被求解^[7],国内外仅有少量学者对中继卫星调度问题进行研究。针对中继卫星的动态调度问题,Deng 等^[8]和 Zhuang 等^[9]分别设计了基于多选择背包问题的调度算法和结合人工蜂群与逼近理想解排序法的调度算法。Zhou 等^[10]将中继卫星任务调度问题构建为混合整数非线性规划模型,通过将其分解为混合整数线性规划子问题,针对性地设计了一种两阶段的算法以进行求解。He 等^[11]面向具有时间窗的动态混合中继卫星任务调度问题,通过联合优化调度周期和天线时间块分配 F 来提高任务的完成率。Spangelo 等^[12]研究了单中继卫星与多地面站的通信调度问题,并设计了一种迭代算法对问题进行求解。王璐琦等^[13]针对地月中继任务的特点,以最小数据丢失量为研究目标,设计了一种基于离散演化算法的地月中继卫星调度算法。何敏潘等^[14]设计了多滑动窗口的中继卫星应用模式,并提出了基于时间自由度的启发式算法对问题模型进行求解。Lin 等^[15]利用中继卫星业务过程中空闲时间窗的时域灵活性和统计特性,提出了一种启发式作业调度框架,以加快时间收敛速度。Net 等^[16]考虑了用户需求的变异性,将与用户需求相关的不确定性因素添加到现有的通信网络体系中,并构建了相应的中继卫星调度模型。李夏苗等^[2]针对采用断点续传技术的中继卫星,提出了一种基于冲突风险评估量化的两阶段调度算法。

对于本文研究的复杂约束条件下的大规模调度优化问题,精确算法很难在有限时间内获得最优解^[17]。传统的智能优化算法虽然也被应用于中继卫星优化调度问题^[18-19],但面对多中继卫星多用户航天器的大规模任务申请的调度场景,会遇到“维数灾难”、难以处理复杂约束条件等问题,严重影响算法求解质量^[19-20]。因此,本文对

研究问题的特点进行深入分析,针对性地提出了一种基于随机搜索策略的求解算法。

1 中继卫星单址天线调度模型

1.1 问题描述与模型假设

本文研究的是多中继卫星多用户航天器大规模调度问题,要求在服从任务需求约束和资源使用约束的情况下获得最优的调度方案^[21]。其中,任务需求指用户向中继卫星相关管理机构提出的对某段时间窗口的占用申请。假设用户在申请时,每项任务可以拥有多个备选服务窗口,可以指定执行该任务的天线,并假设备选服务窗口的开始时间可以在一定范围内滑动。资源使用指任务对中继链路的占用。中继卫星天线分为单址天线和多址天线,多址天线可看作单址天线进行并行传输能力扩展的结果,对单址天线的调度问题扩展和转化即可适用于多址天线。因此,单址天线的调度问题研究是基础,假设每颗中继卫星可以搭载多个单址天线,一个单址天线在同一时刻只能执行一项任务,且单址天线在中继卫星与用户航天器的可见时间窗口内时时可用。

1.2 数学规划模型

模型中用到的符号及定义见表 1。

1.2.1 优化目标

在任务需求约束和资源使用约束的限制下,无法保证每个任务都被成功调度。因此,设定任务完成率为优化目标和评价调度方案质量的重要指标,如式(1)所示。

$$f = \frac{\sum_{t \in T} \sum_{tw_t^i \in TW_t} \sum_{r \in R} \sum_{u_{i,r}^j \in W_{t,r}} x_{t,k,r,j}}{|T|} \tag{1}$$

1.2.2 约束条件

1) 任务需求约束

用户申请任务时可提交多个备选任务时间窗,但在任务调度过程中,每项任务仅能选择一个备选时间窗和一条天线执行。因此任务的执行约束可表示为:

$$\sum_{tw_t^i \in TW_t} x_{t,k,r,j} \leq 1 \tag{2}$$

$$\sum_{r \in R} x_{t,k,r,j} \leq 1 \tag{3}$$

由于某些任务具有很强的时效性,或某些任务本身有特定的执行时段,因此任务的执行时段必须在其相应的备选服务时间窗内,即中继卫星执行任务时段不早于所在备选服务时间窗的最早开始时刻,不晚于其最晚开始时刻。任务的服务时间窗口约束可表示为:

表 1 符号定义
Tab. 1 Definition of symbols

符号	含义说明
R	中继卫星单址天线集合, 天线 $r \in R$
T	用户提交的任务集合, 任务 $t \in T$
TW_t	任务 t 的备选服务时间窗口集合
tw_t^k	任务 t 的第 k 个备选服务时间窗口, $tw_t^k \in TW_t$
$W_{t,r}$	任务 t 的航天器与中继卫星天线 r 可见时间窗口集合
$w_{t,r}^j$	任务 t 的航天器与第 r 条中继卫星天线第 j 个可见时间窗口, $w_{t,r}^j \in W_{t,r}$
L_t	任务 t 的航天器与中继卫星天线链路集合
l_t^k	任务 t 的航天器与中继卫星第 k 条链路, $l_t^k \in L_t$
adj	执行任务前中继卫星单址天线对准所需时间
rec	任务结束后中继卫星单址天线复位所需时间
$adv_{t,k}$	tw_t^k 的开始时刻可前移时段
$del_{t,k}$	tw_t^k 的结束时刻可后移时段
$start_{t,k}$	tw_t^k 的开始时刻
r_t^k	tw_t^k 指定的中继卫星天线, $r_t^k \in R$
$\bar{r}_t^k$	tw_t^k 偏好的中继卫星天线, $\bar{r}_t^k \in R$
$nt_{t,k}$	tw_t^k 的期望服务时长
$tshort_{t,k}$	tw_t^k 的最短服务时长
$Accstart_{t,r}^j$	任务 t 的用户航天器与中继卫星天线 r 的第 j 个可见时间窗口的开始时刻
$Accend_{t,r}^j$	任务 t 的用户航天器与中继卫星天线 r 的第 j 个可见时间窗口的结束时刻
$x_{t,k,r,j}$	0-1 变量, 任务 t 在 tw_t^k 和 $w_{t,r}^j$ 内执行完成时等于 1, 否则等于 0
$taskstart_{t,k,r,j}$	任务 t 在 tw_t^k 和 $w_{t,r}^j$ 下的实际开始执行时刻
$st_{t,k,r,j}$	任务 t 在 tw_t^k 和 $w_{t,r}^j$ 下的实际服务时长
$E_{t,r}$	任务 t 在天线 r 中的实际执行时长
$ps_{t,k,r,j}$	tw_t^k 与 $w_{t,r}^j$ 匹配得到的可用时间段的开始时刻
$pe_{t,k,r,j}$	tw_t^k 与 $w_{t,r}^j$ 匹配得到的可用时间段的结束时刻

$taskstart_{t,k,r,j} \geq (start_{t,k} - adv_{t,k}) \cdot x_{t,k,r,j} \quad (4)$

$taskstart_{t,k,r,j} \cdot x_{t,k,r,j} \leq start_{t,k} + del_{t,k} \quad (5)$

若用户在任务所选的备选服务时间窗指定中继卫星天线, 则必须使用当前任务计划指定的中

继卫星天线执行该项任务, 否则任务调度失败。因此, 任务的服务天线约束可表示为:

$r = r_t^k, \forall ((r_t^k \neq \emptyset) \wedge (x_{t,k,r,j} \neq 0)) \quad (6)$

调度过程中任务的实际服务时长应不大于任务的期望服务时长, 同时不应小于备选服务时间窗的最短服务时长。因此任务的服务时长约束可表示为:

$st_{t,k,r,j} \leq nt_{t,k} \quad (7)$

$st_{t,k,r,j} \geq tshort_{t,k} \quad (8)$

2) 资源使用约束

天线能力约束主要表现为三个方面: 一是同一时刻天线仅能执行一项任务; 二是在任务执行前中继卫星与用户航天器需要进行天线对准操作, 即在任务执行前占用一定的时间将天线转动到合适角度; 三是在任务结束后, 天线需要一定的时间复位。因此天线能力约束可表示为:

$[taskstart_{t_1,k,r,j} - adj, taskstart_{t_1,k,r,j} + E_{t_1,r} + rec] \cap [taskstart_{t_2,k,r,j} - adj, taskstart_{t_2,k,r,j} + E_{t_2,r} + rec] = \emptyset, \forall (r \in R, t_1 \in T, t_2 \in T) \quad (9)$

由于任务执行过程不允许中断, 所以任务应该在中继卫星与用户航天器的某个可见时间窗内执行完成。因此可见时间窗口约束可表示为:

$\sum_{w_{t,r}^j \in W_{t,r}} x_{t,k,r,j} \leq 1 \quad (10)$

$taskstart_{t,k,r,j} \geq Accstart_{t,r}^j \cdot x_{t,k,r,j} \quad (11)$
 $(taskstart_{t,k,r,j} + st_{t,k,r,j}) \cdot x_{t,k,r,j} \leq Accend_{t,r}^j \quad (12)$

综上所述, 中继卫星单址天线调度问题为最大化式(1)函数, 并服从式(1)~(12)中定义的约束条件。

2 中继卫星单址天线调度算法设计

2.1 算法流程描述

针对调度模型的特点, 设计了基于随机搜索策略的调度算法 (Scheduling Algorithm based on Stochastic sEarch strategy, SA-SE)。该算法主要包括 5 个算法模块: ①任务资源匹配与邻域生成; ②实际服务时间窗生成; ③任务冲突分析; ④邻域搜索与冲突消解; ⑤资源与任务集更新。其中, 模块①根据任务提交的备选服务时间窗口信息为任务匹配中继卫星资源, 以任务的多种可执行方案作为该任务调度的邻域。模块②根据模块①的结果, 生成任务的实际服务时间段。模块③对任务实际服务时间段之间的冲突进行检测与分析, 找出造成冲突的关键任务, 生成任务的“扰动-删除”池。模块④对于“扰动-删除”池中的任务进

行随机扰动,或将任务删除,逐步迭代利用邻域搜索过程消解任务冲突。模块⑤删除无冲突的资源与任务,更新资源与任务集,通过重复上述过程,使调度方案不断优化。算法流程如图1所示。

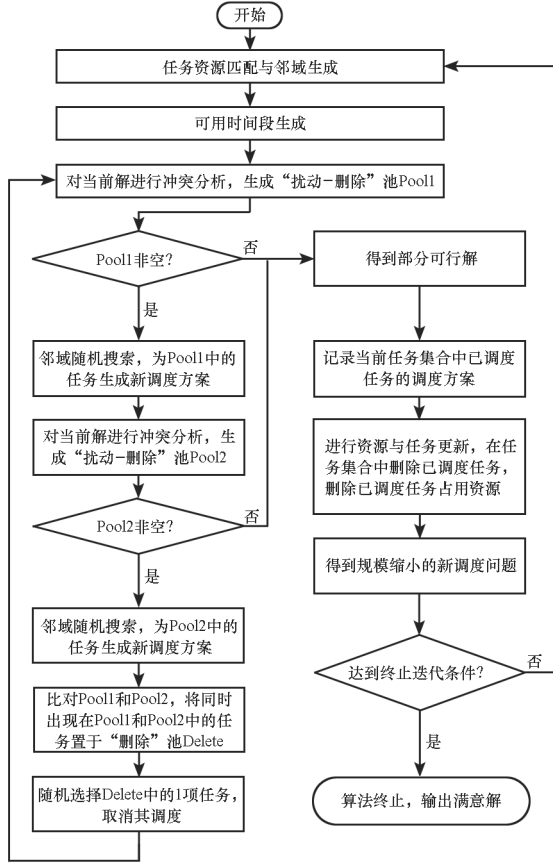


图1 基于随机搜索策略的调度算法流程

Fig.1 Flow of scheduling algorithm based on stochastic search strategy

2.2 任务资源匹配与邻域生成

遍历任务集合 T , 对于当前进行处理的任务 t , 遍历其提交的备选服务时间窗口集 TW_t , 若用户指定了天线 r_t^k ($r_t^k \in R$), 则将备选服务窗口与天线 r_t^k 的可见时间窗口 $w_{t,r}^j$ ($w_{t,r}^j \in W_{t,r}$) 进行比对; 否则与所有天线的可见时间窗口进行比对, 得到所有可以执行任务的可用时段资源。将每个任务的可用时段储存在每个任务调度方案对应的邻域中。任务资源匹配过程如图2所示, 可用时段资源长度 $[ps_{t,k,r,j}, pe_{t,k,r,j}]$ 是任务备选服务时间窗口和可见时间窗口的重叠部分, 可表示为:

$$\begin{cases} ps_{t,k,r,j} = \max(Accstart_{t,r}^j, start_{t,k} - adv_{t,k}), \\ pe_{t,k,r,j} = \min(Accend_{t,r}^j, start_{t,k} + tshort_{t,k} + del_{t,k}), \\ pe_{t,k,r,j} - ps_{t,k,r,j} \geq st_{t,k,r,j} \end{cases} \quad (13)$$

在匹配时任务服务时长采用各备选服务时间窗口 tw_t^k 的最短服务时长 $tshort_{t,k}$, 以保证所有可

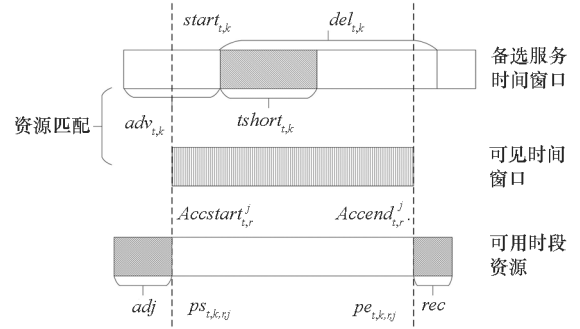


图2 任务资源匹配方法示意图

Fig.2 Diagram of task resource match method

能解的情况均包含在匹配结果当中。

2.3 实际服务时间窗生成

根据任务资源匹配的结果, 产生任务的实际服务时间窗, 作为任务调度的初始方案。遍历每个任务的可用时段资源, 若可用时段资源长度大于或等于该任务的期望服务时长, 则选择期望服务时长作为实际服务时长; 若可用时段资源小于期望服务时长, 且大于最短服务时长, 则选择该任务的最短服务时长作为实际服务时长, 即

$$st_{t,k,r,j} = \begin{cases} nt_{t,k}, & pe_{t,k,r,j} - ps_{t,k,r,j} \geq nt_{t,k} \\ tshort_{t,k}, & nt_{t,k} \geq pe_{t,k,r,j} - ps_{t,k,r,j} \geq tshort_{t,k} \end{cases} \quad (14)$$

因此, 每个任务的实际服务时间窗可表示为 $aw_{t,k,r,j} = [st_{t,k,r,j}, st_{t,k,r,j} + E_{t,r}]$, 从而可以确定该阶段的任务调度方案。然而, 由于初始调度方案中各任务之间可能存在资源和时段的冲突, 需要进一步对冲突进行分析与消解。

2.4 任务冲突分析

首先, 遍历当前调度方案中所有被调度的任务, 将其占用资源依次与其他被调度任务的占用资源进行比对, 如果两项任务使用相同中继卫星天线且占用时段有交集, 则两项任务之间有冲突, 将两项任务的编号记入冲突列表。

然后, 对冲突列表中每项任务出现的次数进行统计分析, 并对任务按照出现次数进行降序排列。若存在冲突的任务数为 num , 设置阈值 $threshold \in (0, 1)$, 对于排序在 $num \times threshold$ 之前的任务, 将其放入“扰动-删除”池, 转入邻域搜索与冲突消解模块进行下一步的邻域搜索冲突消解操作; 若当前解不存在任务冲突, 则返回空的“扰动-删除”池, 表明当前阶段冲突消解完成, 转入资源与任务集更新模块。

2.5 邻域搜索与冲突消解

邻域搜索与冲突消解主要根据任务冲突分析

的结果,对“扰动-删除”池中的任务进行随机扰动,或将任务删除,逐步迭代消解任务冲突。该模块共有 3 个步骤:

Step1:清空“扰动-删除”池中所有任务的调度方案,重新对其进行调度方案的安排,即对于每项任务在其邻域范围内随机游走,生成新的实际服务窗,转入 Step2。

Step2:调用任务冲突分析模块,对于 Step1 中生成的新调度方案进行冲突检测与分析,重新生成新的“扰动-删除”池。若新的“扰动-删除”池为空,表明当前阶段冲突消解完成,转入资源与任务集更新模块;否则重复邻域搜索的操作,生成新的调度方案,并转入 Step3。

Step3:对 Step1 和 Step2 中的两个“扰动-删除”池进行对比分析,找出同时出现在两个“扰动-删除”池中的任务并记入“删除”池,随机选择一个“删除”池中的任务,清空其调度方案,在当前阶段的算法流程中删除该任务,生成新的解。之后转入任务冲突分析模块,对新解进行冲突检测与分析。

2.6 资源与任务集更新

当算法每次调用任务冲突分析模块后生成的“扰动-删除”池为空集时,将当前解中所有成功调度任务的方案记录之后从任务集合 T 中删除,并将成功调度的任务所占用的时段从可见时间窗口和天线可用时间窗口中删除,从而实现资源与任务集的更新。其本质是得到一个小于当前问题规模的新的调度问题,再重新转入任务资源匹配与邻域生成模块,从而实现重复迭代优化。

资源与任务集更新模块同时负责控制算法整体的运行与终止,当达到预设的算法终止条件或迭代次数时,终止算法的迭代过程,保留当前调度方案作为算法的输出。

3 仿真实验

3.1 实验设置

由于研究的问题不存在标准测试集,基于 STK 和 MATLAB 2014 展开中继卫星资源与任务需求场景仿真和算法测试。仿真环境为搭载 3.29 GHz Intel Core CPU、8GB 内存和 Windows 7 OS 的计算机。

仿真场景设定参数与文献[14]一致,假设有 4 颗单址天线中继卫星和 20 个用户航天器。用户共提交了 500 个任务,计划于 2017 年 12 月 1 日 0 时到 2017 年 12 月 7 日 0 时之间执行。每项

任务包括 1~3 个备选服务时间窗口,备选服务时间窗口开始时间的可前移时段和可后移时段的长度服从正态分布 $N(1800,300)$,备选服务时间窗口的期望时长服从正态分布 $N(900,300)$ 。任务开始前天线对准时间设定为 600 s,任务结束后天线复位时间设定为 240 s。此外,在同一中继卫星调度场景下,将本所提算法与基于时间自由度的启发式算法(Heuristic Algorithm based on Time Freedom Degree, HA-TFD)^[14]比较。HA-TFD 的主要步骤如下:

Step1:遍历任务集 T , $WIN_{\max}$ 为任务集 T 中的最大备选服务时间窗口数量, win_t 为当前任务 t 的备选服务时间窗口数量, $win_{t,\alpha}$ 为任务 t 指定天线时的备选服务窗口数量。

Step2:根据式(15)依次计算 T 中任务的时间自由度。

$$TFD_t = (WIN_{\max} + 1 - win_t) + (WIN_{\max} - win_t + win_{t,\alpha})$$

(15)

Step3:依次从任务集 T 中选取 TFD_t 值最高的任务 t 。

Step4:遍历任务 t 的可用时间窗口,为其安排合适的服务资源以形成调度方案,并从任务集 T 中删除已被调度的任务 t 。

Step5:如果 $T = \varnothing$,算法结束;否则转到 Step3。

3.2 实验结果

将算法重复运行 20 次,取各项评价指标的平均值,实验结果见表 2。由表 2 可知,所提 SA-SE 能将 HA-TFD 的任务完成率从 76.4% 提高至 82.4%。但 SA-SE 的运行时间较长,其使用近 158 s 的时间完成 500 项任务的调度,相比 HA-TFD,为典型的“以时间换精度”。总体上,运用 SA-SE 求解中继卫星调度问题能够获得更高质量的调度方案,较大程度上满足用户的实际需求,适用于对调度方案质量要求较高的工作场景。

表 2 算法性能比较

Tab. 2 Performance comparison of the algorithms

评价指标	SA-SE	HA-TFD
任务完成数	429	382
任务完成率/%	85.8	76.4
算法运行时间/s	157.927 325	1.797 987

3.3 参数影响分析

为了研究不用参数对算法性能的影响,在上

文构建的中继卫星调度场景中,依次按照不同任务规模(表 3 场景编号 1~6)、不同用户航天器数量(表 3 场景编号 3 和编号 7~11)、不同中继卫星数量(表 3 场景编号 3 和编号 12~16)以及不同最大备选服务时间窗口数量(表 3 场景编号 3 和编号 17~20),对本文提出的调度算法性能的变化进行分析,实验结果见表 3。

表 3 场景编号 1~6 的结果显示:随着任务规模的扩大,算法的平均任务完成数量增大,当到达一定数值之后,增长速度明显降低,此时中继卫星系统资源已接近最大程度被利用,难以实现进一步增长。而随着任务规模的扩大,算法的平均任务完成数量增长速度小于任务申请数量的增长速度,平均任务完成率呈现下降趋势。算法平均运行时间则随任务规模的扩大迅速增长。因此,任务规模对算法性能和调度工作影响很大。

表 3 场景编号 3 和编号 7~11 的结果表明:随着用户航天器数量的增加,算法平均任务完成数量呈现一定的波动,平均任务完成率呈现相应

波动。平均算法运行时间在不同用户航天器数量场景下基本保持平稳。因此,用户航天器数量对算法性能和调度工作影响较小。

表 3 场景编号 3 和编号 12~16 的结果表明:随着中继卫星数量的增加,算法平均任务完成数量增大,当到达一定数值之后,增长速度明显降低;相应地,平均任务完成率呈现相同趋势。算法平均运行时间随中继卫星数量的增大平稳增长。因此,中继卫星数量对算法性能和调度工作影响很大。

表 3 场景编号 3 和编号 17~20 的结果显示:随着最大备选服务时间窗口数量的增加,算法平均任务完成数和平均任务完成率平稳增长,增长至 4 个备选服务窗口结束并略有波形。平均算法运行时间在不同用户航天器数量场景下基本保持较为稳定的增长。因此,用户航天器数量对算法性能和调度工作有一定影响,设置合适的最大备选服务时间窗口数量,有利于调度工作质量的提高。

表 3 不同参数下的算法实验结果
Tab. 3 Experimental results of algorithm by using different parameters

场景编号	最大备选服务窗口数	中继卫星数	用户航天器数	申请任务数	平均任务完成数	平均任务完成率/%	平均算法运行时间/s
1	3	4	20	100	98	98.00	24.996 064
2	3	4	20	300	277	92.33	77.575 747
3	3	4	20	500	431	86.20	159.223 277
4	3	4	20	800	580	72.50	417.814 73
5	3	4	20	1200	701	58.42	1368.597 586
6	3	4	20	1600	726	45.38	3405.597 902
7	3	4	4	500	384	76.80	198.474 499
8	3	4	8	500	418	83.60	215.813 028
9	3	4	16	500	450	90.00	162.671 994
10	3	4	28	500	439	87.80	154.791 094
11	3	4	36	500	431	86.20	160.433 402
12	3	1	20	500	166	33.20	118.850 797
13	3	2	20	500	296	59.20	143.722 471
14	3	6	20	500	477	95.40	217.362 875
15	3	8	20	500	486	97.20	263.034 92
16	3	10	20	500	490	98.00	342.782 366
17	1	4	20	500	344	68.80	88.667 122
18	2	4	20	500	395	79.00	119.420 048
19	4	4	20	500	453	90.60	199.046 299
20	5	4	20	500	452	90.40	245.246 779

4 结论

针对中继卫星单址天线调度问题,重点考虑了调度任务间的冲突与用户的实际需求。为了更加符合实际情况,最大程度体现用户申请的自主性和灵活性,设计了多滑动窗口用户申请的中继卫星应用模式,允许用户提交多个备选服务窗口,指定偏好天线。同时,以最大化任务完成率为目标函数,以任务需求约束、资源使用约束作为约束条件,构建了中继卫星调度问题的数学规划模型。并借鉴智能优化算法随机搜索的思想来指导邻域搜索,设计了基于随机搜索策略的中继卫星调度算法,较好地解决了多中继卫星多用户航天器大规模调度问题。实验结果表明:基于冲突消解和随机搜索策略的算法适用于对调度方案质量要求较高的工作场景,其能获得较高质量的调度方案,但不足之处在于算法运行时间较长。下一步的研究将结合智能优化算法,设计高效稳定的邻域结构和改进策略,在保持调度方案质量的同时,进一步提高调度效率。同时针对中继卫星存在数据传输、测控等多样性任务的需求,研究多址模式的调度算法。

参考文献 (References)

[1] Brandel D L, Watson W A, Weinberg A. NASA's advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(7): 1141 – 1151.

[2] 李夏苗, 陈新江, 伍国华, 等. 考虑断点续传的中继卫星调度模型及启发式算法[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 269 – 284.

LI Xiamiao, CHEN Xinjiang, WU Guohua, et al. Scheduling model and heuristic algorithm for tracking and data relay satellite considering breakpoint transmission [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 269 – 284. (in Chinese)

[3] 刘洵, 谢金森, 陈双武. 链路状态感知的低轨卫星网络路由机制[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 33 – 40.

LIU Xun, XIE Jinsen, CHEN Shuangwu. Link quality aware routing scheme in LEO satellite network [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(2): 33 – 40. (in Chinese)

[4] 周志鑫, 吴志刚, 季艳. 空间对地观测技术发展及应用[J]. 中国工程科学, 2008, 10(6): 28 – 32.

ZHOU Zhixin, WU Zhigang, JI Yan. Development and application of earth observation and nation security [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(6): 28 – 32. (in Chinese)

[5] Deng B, Jiang C, Kuang L, et al. Two-phase task scheduling in data relay satellite systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(2): 1782 – 1793.

[6] Chen H, Li L, Zhong Z, et al. Approach for earth observation satellite real-time and playback data transmission scheduling [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(5): 982 – 992.

[7] Wang P, Reinelt G, Gao P, et al. A model, a heuristic and a

decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(2): 322 – 335.

[8] Deng C, Guo W, Hu W. Dynamic scheduling algorithm for data relay services in next-generation TDRS systems [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2018, 15(11): 665 – 669.

[9] Zhuang S F, Yin Z D, Wu Z L, et al. Dynamic relay satellite scheduling based on ABC-TOPSIS algorithm [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 1 – 11.

[10] Zhou D, Sheng M, Liu R, et al. Channel-aware mission scheduling in broadband data relay satellite networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 1052 – 1064.

[11] He L, Li J, Sheng M, et al. Dynamic scheduling of hybrid tasks with time windows in data relay satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4989 – 5004.

[12] Spangelo S, Cutler J, Gilson K, et al. Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem [J]. Computers & Operations Research, 2015, 57: 1 – 16.

[13] 王璐琦, 刘冰怡, 郭薇, 等. 最小数据丢失量的地月中继卫星任务调度研究[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(1): 60 – 69.

WANG Luqi, LIU Bingyi, GUO Wei, et al. Task scheduling of lunar relay satellites for minimal data loss [J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(1): 60 – 69. (in Chinese)

[14] 何敏藩, 朱燕麒, 贾学卿. 考虑多滑动窗口的中继卫星调度模型及启发式算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(5): 11 – 21.

HE Minfan, ZHU Yanqi, JIA Xueqing. Scheduling model and heuristic algorithm for tracking and data relay satellite considering multiple slide windows [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(5): 11 – 21. (in Chinese)

[15] Lin P, Kuang L, Chen X, et al. Adaptive subsequence adjustment with evolutionary asymmetric path-relinking for TDRSS scheduling [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(5): 800 – 810.

[16] Net M S, Portillo I D, Cameron B, et al. Architecting space communication networks under mission demand uncertainty [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2015: 1 – 11.

[17] Rojanasoonthon S. Parallel machine scheduling with time windows [D]. USA: University of Texas at Austin, 2004.

[18] Zhang Z, Hu F, Zhang N. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem [J]. Applied Intelligence, 2018, 48(10): 3295 – 3305.

[19] 邓博于, 赵尚弘, 侯睿, 等. 基于遗传蚁群融合算法的混合链路中继卫星资源调度研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2211 – 2217.

DENG Boyu, ZHAO Shanghong, HOU Rui, et al. Research for resources scheduling of relay satellite system with hybrid links based on fusion algorithm of genetic and ant colony [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2211 – 2217. (in Chinese)

[20] Du J, Jiang C, Qian Y, et al. Resource allocation with video traffic prediction in cloud-based space systems [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(5): 820 – 830.

[21] Zhu X, Jiang C, Kuang L, et al. Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2253 – 2267.