

基于遗传算法的低轨卫星物联网星座任务规划问题

李艳红, 吕 强, 梁军民, 封世刚, 苗君厚
(北京国电高科科技有限公司, 北京 100094)

摘 要: 针对无星间链路的低轨卫星物联网星座, 设计一种基于遗传算法的任务规划算法, 旨在通过多地面站实现数据实时通信的同时, 最大化卫星和地面站的资源配置。首先设计最大化卫星在轨服务时长的目标函数和限制冲突弧段的约束条件, 构建低轨卫星物联网星座任务规划模型; 然后以遗传算法为基础, 引入冲突弧段和早停机制, 设计低轨卫星物联网星座任务规划算法。在此基础上, 使用由 18 颗无星间链路的低轨通信卫星构成的卫星星座和 4 个地面站进行实验。同时为了验证算法性能, 使用先来先服务算法对实验数据进行任务规划。实验结果表明, 设计的低轨卫星物联网星座任务规划算法可以显著提高地面站接收通信卫星数据的调度能力, 解决卫星数量众多而地面站不足的矛盾。

关键词: 遗传算法; 低轨卫星物联网星座; 任务规划; 在轨服务时长; 冲突弧段

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024018

Mission Planning for LEO Satellite IoT Constellation Based on Genetic Algorithm

LI Yanhong, LYU Qiang, LIANG Junmin, FENG Shigang, MIAO Junhou
Beijing Guodian Gaoke Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract: A mission planning algorithm based on genetic algorithm was designed for LEO satellite IoT constellation with no inter-satellite links, aimed to achieve real-time data communication through multiple ground stations while maximized the resource allocation of satellites and ground stations. Firstly, the objective function to maximized the service duration of satellites in orbit and the constraints on clashed tasks were designed, constructed the mission planning model for LEO satellite IoT constellation. Then, based on genetic algorithm, clashed tasks and early stopping mechanism were introduced, and the mission planning algorithm for the LEO satellite IoT constellation was designed. On this basis, experiments were conducted use a constellation of 18 LEO communication satellites without inter-satellite links and 4 ground stations. In addition, in order to verified the performance of the algorithm, first come first service (FCFS) algorithm was also used for mission planning of the experimental data. The experiments compared with FCFS showed that the designed mission planning algorithm for LEO satellite IoT constellation could significantly improve the scheduling capacity of ground stations for receiving data of communication satellites, addressed the contradiction of insufficient ground stations with a large number of satellites.

Keywords: genetic algorithm, LEO satellite IoT constellation, mission planning, the service duration of satellites in orbit, clashed tasks

0 引言

2003 年 10 月 21 日,我国自主研制的首颗微小卫星“创新一号”发射入轨。“创新一号”是我国第一代低轨数据通信小卫星,它的研制成功,标志着我国低轨通信卫星技术进入开发应用阶段^[1]。通信卫星作为空间微波中继站,接收地面站发射的信号,经处理后再转发至其他地面站,实现远距离实时通信^[2]。与高轨通信卫星相比,低轨通信

卫星传输时延小,链路损耗少,能够提供更好的通信质量,但覆盖面积小,实现全球覆盖需要部署大量卫星^[3]。近年来,我国卫星事业发展迅速,卫星星座组网是未来的发展趋势,天启星座是我国首个提供低轨卫星数据通信服务的窄带物联网星座系统。为了满足星座规模化运行需求,解决卫星数量急剧增长和地面站数量有限的矛盾,研究星座系统的多星任务规划问题至关重要。任务规划问题是非确定性多项式难题 (Non-deterministic Polynomial-hard,

NP-hard) 问题^[4-5], 求解耗时长且难以找到全局最优解, 国内外学者已经做了较多的研究工作, 特别是基于遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 等智能优化算法求解卫星任务规划问题的方法有了相对广泛的应用。参考文献[6]在允许卫星数据传输任务部分调度的前提下, 基于冲突消解的遗传算法设计了一种卫星数据传输混合调度算法, 实现卫星数据传输调度加权总执行时间最大化。参考文献[7-8]改进了遗传算法的选择算子、变异算子和交叉算子, 以适用卫星网络资源调度。参考文献[9-10]采用蚁群算法优化卫星数据传输调度任务。参考文献[11]针对遥感集群系统的任务调度问题, 提出了一种基于禁忌搜索的自适应遥感任务调度算法。参考文献[12-14]利用差分进化算法求解多成像卫星调度问题。参考文献[15-17]设计了一种粒子群改进算法, 实现遥感卫星数据传输测控任务一体化调度。参考文献[18]为了解决大规模星座测控资源调度问题, 设计了一种自适应模拟退火算法。参考文献[19-21]动态调整遗传算法的变异概率和交叉概率, 用于解决成像卫星的任务规划问题。参考文献[22]利用强化学习更新遗传算法中的参数, 规划地球电磁卫星的数据传输任务。参考文献[23]设计了两阶段遗传算法解决多卫星多约束的测控资源调度问题。参考文献[24]利用遗传算法解决低轨卫星通信星座测控资源调度问题。

分析上述文献的研究成果可知, 利用智能优化算法解决卫星任务规划问题是主流的研究方向。特别地, 由于遗传算法具有持续学习和高效并行等优良性能, 该算法被更为广泛地应用于解决卫星任务规划问题。同时注意到遥感卫星任务规划发展较早, 已有很多研究成果, 而通信卫星早期多为地球同步卫星, 侧重于单星单站频谱资源调度, 不涉及多星多站任务规划问题, 因此通信卫星的任务规划相关研究工作较少。由于遥感卫星下行数据传输链路的多星多站任务规划和通信卫星下行馈电链路的任务规划问题有相似之处, 因此可以将遗传算法应用于解决通信卫星的多星多站任务规划问题。值得一提的是, 本文只考虑通信方式简单且成本效益高的无星间链路的低轨通信卫星。本文中通信卫星的任务规划指的是优化低轨通信卫星下行馈电链路通信任务的执行策略, 因此如何利用遗传算法解决无星间链路的低轨卫星物联网星座任务规划问题是重点要做的工作。

1 低轨卫星物联网星座任务规划模型

低轨卫星物联网星座任务规划是一个涉及多星多站等多任务的复杂的下行馈电链路数据传输调度问题。图 1

是下行馈电链路数据传输示意, 图中卫星间无星间链路。黄色链路表示卫星和地面站处于可见弧段, 进行数据传输; 绿色链路表示卫星与地面站间的链路断开。卫星 3 与地面站 1 间的数据传输任务完成后, 馈电链路断开, 卫星 3 飞行一段时间后, 卫星 3 与地面站 2 处于可见弧段, 建立馈电链路, 进行数据传输。为简化低轨卫星物联网星座任务规划问题, 首先做出合理假设, 然后为了便于进行描述和讨论, 对本文涉及的关键参数进行规定和定义, 最后设计低轨卫星物联网星座任务规划的目标函数和约束条件, 构建有约束的非线性优化模型。

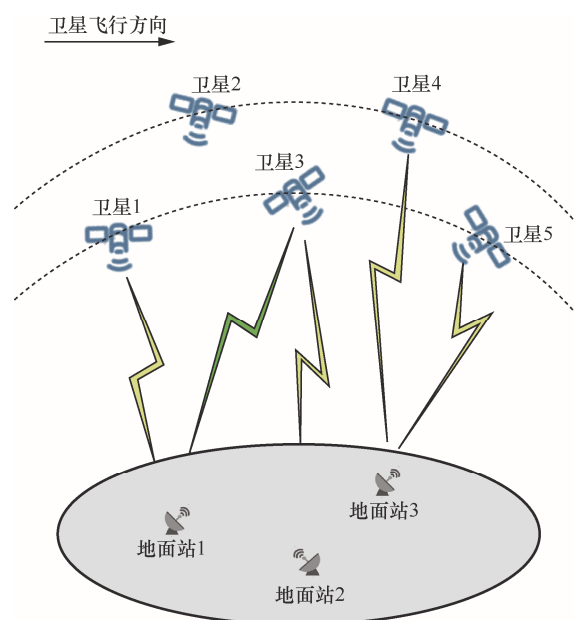


图 1 下行馈电链路数据传输示意

1.1 基本假设

为了更清晰地聚焦低轨通信卫星数据传输问题的核心以及使研究更具针对性和操作性, 同时考虑到低轨通信卫星和地面站的实际情况, 本文做出了如下假设:

- ① 一个地面站有 H 副天线;
- ② 每颗卫星和地面站的可见弧段只进行一个数据传输任务, 且数据传输任务必须完整完成, 不允许部分完成;
- ③ 在卫星数据传输过程中, 需要考虑接受准备时间和资源释放时间。把接受准备时间和资源释放时间的总和当作一个常数 α ;
- ④ 忽略同一个地面站的同一副天线连续执行两次数据传输活动的时间间隔;
- ⑤ 数据传输周期设定为一天;
- ⑥ 卫星和地面站的可见弧段时长大于数据传输持续

时间 b 与 a 的和;

⑦ 每个地面站和每颗卫星间都可以进行数据传输。

1.2 参数定义

为了达到方便表述和后续建模的目的,对研究中用到的参数进行如下定义:

- ① g_i 表示第 i 个地面站, $i = 1, 2, \dots, n$;
- ② s_j 表示第 j 颗卫星, $j = 1, 2, \dots, m$;
- ③ n 为地面站的数量, m 为通信卫星的数量;
- ④ tw_{ij}^l 表示地面站 g_i 与卫星 s_j 的第 l 个可见弧段,

$l = 1, 2, \dots, \varphi_{ij}$;

- ⑤ φ_{ij} 为地面站 g_i 与卫星 s_j 的可见弧段数量;

- ⑥ $N = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varphi_{ij}$ 表示可见弧段的总数量;

⑦ $\text{ts}_{ij}^l, \text{te}_{ij}^l$ 分别表示可见弧段 tw_{ij}^l 的开始时刻和结束时刻;

- ⑧ task_j 表示卫星 s_j 的数据传输任务;

⑨ c_{ij}^l 表示在地面站 g_i 与卫星 s_j 的第 l 个可见弧段, g_i 与 s_j 是否发生数据传输, 发生为 1, 否则为 0。

1.3 模型建立

构建低轨卫星物联网星座任务规划模型是规划卫星数据传输任务的关键一环。低轨卫星物联网星座任务规划模型设计的核心在于两方面:一是设定合理的约束条件,确保任务规划在实际操作中的可行性;二是设计明确的目标函数,厘清任务规划的关键目标以及优化导向。

低轨卫星物联网星座任务规划模型构建主要考虑的约束条件为:对于地面站 g_i , 若卫星 s_j 的第 l' 个弧段和其他任意一颗卫星 s_k ($k \neq j$) 的第 l 个弧段满足 $[\text{ts}_{ij}^{l'}, \text{te}_{ij}^{l'}] \cap [\text{ts}_{ik}^l, \text{te}_{ik}^l] \neq \emptyset$, 则认为两个弧段发生冲突, 并记 β_{ik} 为卫星 s_k 与地面站 g_i 的可见弧段和 $\text{tw}_{ij}^{l'}$ 发生冲突的数量, 则有

$$c_{ij}^{l'} + \sum_{k \neq j} \sum_{l=1}^{\beta_{ik}} c_{ik}^l \leq H \quad (1)$$

其中, $1 \leq l' \leq \varphi_{ij}$ 。式(1)刻画了在同一时刻,和同一地面站进行数据传输的卫星数量不超过天线的数量。该约束条件保障地面站资源的有序分配和使用,避免资源冲突和浪费。

低轨卫星物联网星座任务规划的目标是对于同一颗卫星 s_j , $\forall g_i$, 按照 ts_{ij}^l 将卫星 s_j 的数据传输任务 task_j 进行升序排列, 得到重排后的序列 $\{\text{ts}_j(p), \text{te}_j(p)\}$, $p = 1, 2, \dots, P$, 其中 P 为卫星 s_j 与所有地面站的可见弧段的数量, 则卫星在轨服务时长函数为

$$\max F_{\text{time}} = \max \left\| \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{p=1}^P [c_j(p)\text{ts}_j(p), c_j(p)\text{te}_j(p)] \right\| \quad (2)$$

式(2)表示在满足约束条件式(1)的情况下, 尽可能使得在给定的时间范围内卫星在轨服务时间最长。此任务规划目标在满足数据实时通信需求的同时, 确保对卫星和地面站进行精确调度, 实现资源的最优分配和高效利用。

2 低轨卫星物联网星座任务规划算法

首先引入冲突弧段的概念, 接着分析早停机制和遗传算法。在此基础上, 设计基于遗传算法的低轨卫星物联网星座任务规划算法。

2.1 冲突弧段

为了缩小算法搜索空间, 引入了冲突弧段的概念。冲突弧段设定的规则为: 在某个时间点, 对于固定的某个地面站, 如果和该地面站通信可见的卫星有多颗, 则认为这些弧段发生冲突。

2.2 早停机制

为了避免算法过度学习和限制算法所消耗的运行时间和计算资源, 采用了早停机制, 即若算法目标函数值在过去 T 轮迭代过程中没有明显改善, 则算法停止迭代。

2.3 遗传算法

遗传算法是一种基于全局搜索的并行、高效的方法, 使用“适者生存”的原则, 在搜索过程中主动学习和存储有关搜索空间的知识, 自适应地控制搜索过程, 在进化过程中逐次产生一个近似最优解^[25]。利用遗传算法求解最优化问题的流程为^[26]: 创建初始种群; 计算适应度值; 应用选择、交叉和变异算子; 设置迭代停止条件。

2.4 基于遗传算法的低轨卫星物联网星座任务规划算法

低轨卫星物联网星座任务规划问题是 NP-hard 问题, 遗传算法是解决 NP-hard 问题的一种有效工具。遗传算法通过模拟自然选择和遗传机制, 能在复杂的问题空间中快速搜索到接近最优的解。基于遗传算法的低轨卫星物联网星座任务规划算法的具体步骤如下。

第一步, 设置低轨通信卫星的轨道参数和地面站的经纬度, 利用 STK 仿真软件的可见性分析功能来预报低轨通信卫星与地面站间的所有可见弧段, 将其作为总体输入。每个可见弧段的信息包含弧段 ID、地面站标识、地面站名称、卫星标识、卫星名称、开始时间和结束时间。

第二步, 设计二进制编解码规则, 建立数据传输任务方案与解空间的映射关系。规则如下

$$c = \begin{cases} 1, & \text{弧段ID对应的卫星和地面站在此时间段进行数据传输} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

第三步,根据冲突弧段的设定规则选择用于进化的弧段,将其作为任务规划的搜索空间。

第四步,根据式(1)和式(2)创建任务规划的约束条件和目标函数,构建低轨卫星物联网星座任务规划模型。

第五步,设定选择、交叉、变异算子和超参数,采用遗传算法的启发式方法进行全局搜索,得到一个近似最优的冲突弧段任务规划方案。

利用遗传算法进行冲突弧段任务规划问题的流程如图 2 所示,具体步骤如下。

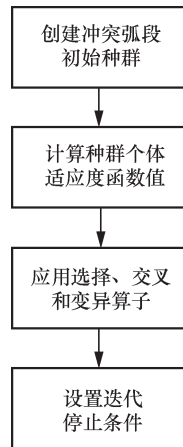


图 2 遗传算法解决冲突弧段任务规划问题的流程

(1) 创建冲突弧段初始种群。遗传算法使用染色体表示个体,染色体是一个长度为冲突弧段数量 X 的二进制字符串,如图 3 所示。初始种群是一组随机生成的染色体的集合,其中种群数量 size_pop 是超参数,需要人为设定。

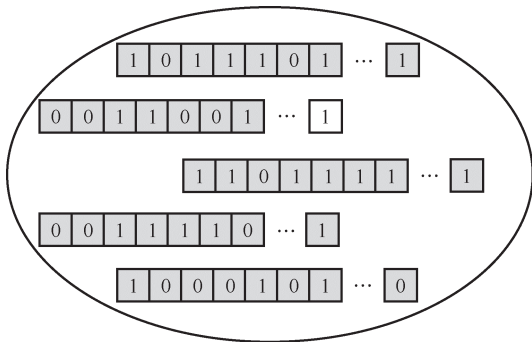


图 3 由长度为 X 的二进制编码染色体所组成的的大小为 size_pop 的种群

(2) 计算种群个体适应度函数值。利用惩罚函数法求解有约束优化问题,构造的适应度函数为

$$\text{Fitness} = F_{\text{time}} + 1 \times 10^5 \sum_{i=1}^n \max \left\{ 0, c_{ij}^i + \sum_{k \neq j} \sum_{l=1}^{\beta_k} c_{ik}^l - H \right\} \quad (3)$$

其中, 1×10^5 是惩罚因子。首先根据式(3)计算初始种群中

每个个体的适应度函数值,然后对于经过选择、交叉和变异算子处理后产生的新一代种群中的个体,都需计算其适应度函数值。由于个体间是相互独立的,因此计算过程可以并行执行。

(3) 应用选择、交叉和变异算子。将选择、交叉和变异算子应用到种群中,会产生新一代种群。选择算子使用锦标赛选择方法,交叉算子使用部分基因交叉方法,变异算子使用单点变异方法。随着迭代的进行,通过选择算子的作用,适应度函数值较低的个体逐渐被淘汰,而适应度函数值较高的个体得以保留并繁衍。与此同时,通过交叉和变异操作,算法能探索新的解空间,生成更优的个体。

(4) 设置迭代停止条件。人为设定最大迭代轮数 max_iter ,并添加早停机制。

第六步,合并不冲突的弧段编码和上述迭代得到的冲突弧段任务规划方案,得到最终的任务规划方案。不冲突的弧段编码都设定为 1,表示卫星和地面站进行数据传输。按照可见弧段的顺序,将上述算法优化得到的冲突弧段任务规划序列插入到不冲突的弧段编码序列中,获得最终的任务规划方案。

3 实验与分析

为了验证本文设计的低轨卫星物联网星座任务规划算法的有效性,基于 STK 软件仿真生成的预报数据进行实验并对生成的实验结果进行分析。

考虑到卫星运行的实际复杂情况,选取了目前实际在轨运行且完全覆盖国内的 18 颗无星间链路的低轨通信卫星和分布在全国的 4 个地面站,18 颗低轨通信卫星构成一个卫星星座,利用 STK 软件生成仿真数据。低轨通信卫星的高度为 500~900 km,卫星调度的时间周期设置为 2024 年 1 月 19 日 00:00:00 至 20 日 00:00:00,生成了 281 个任务。

应用 GA 求解低轨卫星物联网星座任务规划问题的过程中,设置种群规模 size_pop 为 500,最大迭代轮数 max_iter 为 100,变异概率为 0.001,早停机制中 T 设置为 20。低轨卫星物联网星座任务规划实验结果见表 1。

表 1 低轨卫星物联网星座任务规划实验结果

实验	卫星在轨服务时长	算法执行时间/s
GA+全部弧段	23 h 50 min 25 s	9 175.35
GA+冲突弧段	29 h 16 min 20 s	4 569.21
GA+冲突弧段+早停机制	29 h 16 min 20 s	2 945.92
先来先服务 (FCFS) 算法	25 h 08 min 25 s	1.08

首先将 281 个任务作为算法输入, 进行训练, 从表 1 和图 4 可知, 卫星在轨服务时长是 23 h 50 min 25 s, 算法训练 100 轮所需时间为 9 175.35 s, 迭代 70 轮后, 曲线开始收敛, 卫星在轨服务时长没有明显地增加, 但是训练时间会显著延长。与此同时, 在分析卫星任务调度结果的过程中, 发现有部分不存在冲突的弧段没有被选择, 表明当所有任务作为遗传算法的输入时, 该算法平等处理每个任务, 不能专注学习冲突的弧段。因此, 为了降低算法搜索的复杂度, 只将冲突弧段作为算法输入。从表 1 和图 4 可以清晰地看到, 在训练过程中, 只使用冲突弧段的算法求解的卫星在轨服务时长远远高于使用全部弧段的算法, 多 5 h 25 min 55 s。注意到第一轮两者就有较大的差距, 这是由于在开始时只使用冲突弧段的算法就包含了所有的非冲突弧段, 而使用全部弧段的算法只涉及了部分的非冲突弧段。另外只使用冲突弧段的算法执行时间减少了原来的一半多, 这是由于搜索空间减小, 算法更容易收敛。从图 4 可以发现, 只使用冲突弧段的算法在训练 40 轮后, 曲线开始收敛, 46 轮以后卫星在轨服务时长不再发生变化。为了减少算法执行时间, 引入了早停机制, 这是因为设置了随机种子, 可以保证初始种群的一致性。从表 1 和图 4 可以发现, 引入早停机制后的算法可以得到和只使用冲突弧段的算法相同的卫星在轨服务时长, 但因为过去连续 20 次迭代中, 服务时长没有变化, 所以算法在 65 轮停止迭代, 与不加入早停机制的算法相比, 此算法执行时间缩短了 27 min 左右。

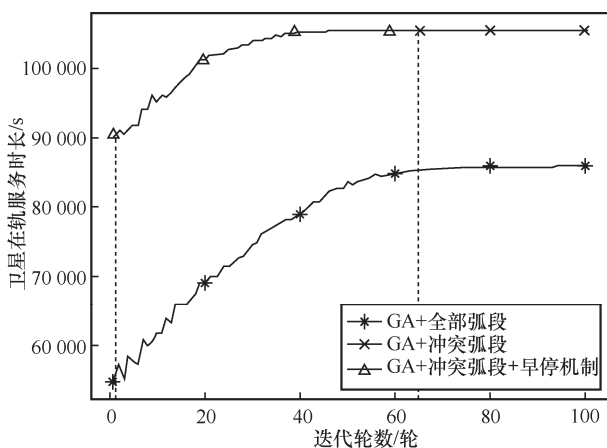


图 4 基于 GA 的任务规划实验对比

为了验证基于遗传算法的低轨卫星物联网星座任务规划算法的性能, 还使用先来先服务 (First Come First Service, FCFS) 算法对上述实验数据进行了规划。FCFS 算法的核心思想是依据卫星和地面站的可见弧段的开始

时刻来决定数据传输的次序, 实验结果见表 1。从表 1 可以看出, 结合冲突弧段和早停机制的遗传算法求解的卫星在轨服务时长比 FCFS 算法规划的卫星在轨服务时长多 14 875 s。

从实验结果可知, 结合冲突弧段和早停机制的遗传算法适用于低轨卫星物联网星座任务规划问题, 可以有效解决卫星数量众多与地面站数量不足之间的矛盾, 实现低轨卫星和地面站资源的优化配置, 显著提高卫星的任务执行能力, 为高效实时通信提供了坚实的保障。

4 结束语

本文设计的算法已经在无星间链路的低轨卫星物联网星座工程建设中得到应用, 并取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 朱芝松. 上海市志·工业分志·航天业卷: 1978-2010[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2015.
ZHU Z S. Annals of shanghai, industrial subsection, aerospace industry volume: 1978-2010[M]. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House, 2015.
- [2] 吕翊. 电信传输技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
LYU Y. Telecommunication transmission technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [3] 郑爽, 张兴, 王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 97-105.
ZHENG S, ZHANG X, WANG W B. Survey of low earth orbit satellite communication network routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 97-105.
- [4] 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.
LIN Y S, JIANG H L, DONG Y L, et al. Research of dynamic scheduling method for communication satellite resources based on genetic algorithm[J]. Radio Engineering, 2017, 47(6): 20-23.
- [5] 梁记源. 针对多目标成像的卫星轨道机动任务规划问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
LIANG J Y. An investigation on the mission planning of satellite orbit maneuver for multi-target imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [6] 李云峰, 武小悦. 遗传算法在卫星数据传输调度问题中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 124-131.
LI Y F, WU X Y. Application of genetic algorithm in satellite data

- transmission scheduling problem[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2008, 28(1): 124-131.
- [7] 赵卫虎, 赵静, 赵尚弘, 等. 自适应遗传算法的数据中继卫星光网络资源调度算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1311-1316.
- ZHAO W H, ZHAO J, ZHAO S H, et al. Scheduling algorithm for data relay satellite optical network based on self-adaptive genetic algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1311-1316.
- [8] 杨力, 杨恒, 魏德宾, 等. SAGA: 一种面向任务的卫星网络资源分配算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(1): 122-127.
- YANG L, YANG H, WEI D B, et al. SAGA: a task-oriented resource allocation algorithms for satellite network[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(1): 122-127.
- [9] 陈祥国, 武小悦. 蚁群算法在卫星数据传输调度问题中的应用[J]. *系统工程学报*, 2009, 24(4): 451-456.
- CHEN X G, WU X Y. Ant colony algorithm for satellite data transmission scheduling problem[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(4): 451-456.
- [10] 黄双临, 马冬青, 方冬梅, 等. 基于改进蚁群算法的卫星数据传输调度[J]. *无线电工程*, 2015, 45(7): 27-30.
- HUANG S L, MA D Q, FANG D M, et al. Satellite data transmission scheduling based on improved ant colony system[J]. *Radio Engineering*, 2015, 45(7): 27-30.
- [11] 胡永权. 基于禁忌搜索的遥感任务自适应调度研究[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- HU Y Q. Research on adaptive scheduling of remote sensing task based on Tabu search[D]. Kaifeng: Henan University, 2017.
- [12] CHEN X Y, REINELT G, DAI G M, et al. Priority-based and conflict-avoidance heuristics for multi-satellite scheduling[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 69: 177-191.
- [13] 彭攀, 白沐炎, 陈长春, 等. 改进差分进化算法求解多成像卫星调度问题[J]. *上海航天(中英文)*, 2020, 37(1): 24-32.
- PENG P, BAI M Y, CHEN C C, et al. An improved differential evolution algorithm for multi-imaging-satellite scheduling[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2020, 37(1): 24-32.
- [14] 丁祎男, 雷拥军, 王淑一, 等. 面向重访周期需求的敏捷成像卫星任务规划方法[J]. *空间控制技术与应用*, 2024, 50(2): 23-29.
- DING Y N, LEI Y J, WANG S Y, et al. Agile imaging satellite task planning method for revisit time requirements[J]. *Aerospace Control and Application*, 2024, 50(2): 23-29.
- [15] 王峥. 基于离散粒子群算法的卫星地面站任务规划系统[J]. *科技与创新*, 2020(24): 18-21.
- WANG Z. Mission planning system of satellite ground station based on discrete particle swarm optimization algorithm[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2020(24): 18-21.
- [16] 樊慧晶. 基于卫星数据传输与测控任务的地面站资源调度研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2021.
- FAN H J. Research on resource scheduling of ground station based on satellite data transmission and telemetry tracing and control tasks[D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [17] 樊慧晶, 章文毅, 田妙苗, 等. 基于粒子群算法的卫星任务地面站资源调度方法[J]. *中国科学院大学学报*, 2022, 39(6): 801-808.
- FAN H J, ZHANG W Y, TIAN M M, et al. A resource scheduling method for satellite mission ground station based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 39(6): 801-808.
- [18] 伍国华, 王天宇. 基于自适应模拟退火的大规模星座测控资源调度算法[J]. *航空学报*, 2023, 44 (12): 265-286.
- WU G H, WANG T Y. Large-scale constellation TT&C resource scheduling algorithm based on adaptive simulated annealing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44 (12): 265-286.
- [19] 赵萍, 陈志明. 应用于卫星自主任务调度的改进遗传算法[J]. *中国空间科学技术*, 2016, 36(6): 47-54.
- ZHAO P, CHEN Z M. An adapted genetic algorithm applied to satellite autonomous task scheduling[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2016, 36(6): 47-54.
- [20] ZHENG Z X, GUO J, GILL E. Swarm satellite mission scheduling & planning using Hybrid Dynamic Mutation Genetic Algorithm[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137: 243-253.
- [21] YANG Y, LIU D. Research on multi-satellite mission planning based on improved genetic algorithm[C]//2022 3rd International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 331-335.
- [22] SONG Y J, OU J W, SUGANTHAN P N, et al. Learning adaptive genetic algorithm for earth electromagnetic satellite scheduling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(6): 9010-9025.
- [23] 李婷, 贾鹏德, 杨宇, 等. 面向卫星常规测控任务的地面站资源

调度[J]. 系统仿真技术, 2024, 20(1): 65-72.

LI T, JIA P D, YANG Y, et al. Resource scheduling of ground stations for conventional satellite TT&C tasks[J]. System Simulation Technology, 2024, 20(1): 65-72.

- [24] 袁普钊, 江涛, 稽誉, 等. 基于遗传算法的低轨星座测控资源调度方案设计[J]. 电信快报, 2024(1): 37-40.

YUAN P Z, JIANG T, JI Y, et al. Design of low earth orbit constellation tracking telemetry and command scheduling scheme based on genetic algorithm[J]. Telecommunications Information, 2024(1): 37-40.

- [25] CHONG E K, ŻAK S H. An introduction to optimization, fourth edition[M]. New Jersey: John , & Sons Inc, 2013.

- [26] WIRSANSKY E. Hands-on genetic algorithms with python: applying genetic algorithms to solve real-world deep learning and artificial intelligence problems[M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2020.

[作者简介]



李艳红 (1998-), 女, 硕士, 北京国电高科科技有限公司软件工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信、计算机视觉。

吕强 (1980-), 男, 博士, 北京国电高科科技有限公司董事长兼 CEO, 高级工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信。

梁军民 (1987-), 男, 硕士, 北京国电高科科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信。

封世刚 (1984-), 男, 本科, 北京国电高科科技有限公司软件部经理, 主要研究方向为低轨卫星通信地面系统。

苗君厚 (1973-), 男, 本科, 北京国电高科科技有限公司中级工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信、动力与环境工程。