

基于改进萤火虫算法的卫星边缘计算卸载策略

乐恒志, 李 悦, 袁一卿

(中国人民解放军91977部队, 北京 100036)

摘 要: 卫星网络因其全球覆盖优势, 能够为6G网络提供重要支撑。在低轨卫星星座中引入移动边缘计算可以为地面用户提供低时延、高可靠服务。考虑到地面用户业务的随机性及卫星资源的差异性带来的卫星工作负载不均衡问题, 为了合理分配卫星任务, 将计算卸载问题建模为数学优化问题。进一步地, 设计了一种改进萤火虫算法求解最优方案。仿真结果表明, 与基准算法相比, 所提算法的有效性得到验证。

关键词: 卫星边缘计算; 任务卸载; 负载均衡; 萤火虫算法

中图分类号: TN926.6

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025038

Offloading Strategy for Satellite Edge Computing Based on Improved Glowworm Algorithm

LE Hengzhi, LI Yue, YUAN Yiqing

Unit 91977 of the PLA, Beijing 100036, China

Abstract: Satellite networks, with their global coverage advantages, play a crucial role in supporting 6G networks. The integration of mobile edge computing into low earth orbit satellite constellations can provide ground users with low-latency and highly reliable services. Considering the randomness of ground user demands and the heterogeneity of satellite resources, which lead to imbalanced satellite workloads, the task allocation problem is formulated as a mathematical optimization model to ensure a reasonable distribution of satellite tasks. Furthermore, an improved glowworm algorithm is designed to obtain the optimal solution. Comparative evaluations with benchmark algorithms, the effectiveness of the proposed approach has been validated through simulations.

Keywords: satellite edge computing, task offloading, workload balance, glowworm algorithm

0 引言

近年来, 地面互联网在智慧城市、环境监测等领域发展迅速^[1-2]。然而, 其在海岛、海洋、沙漠等偏远地区的覆盖不足, 在自然灾害(如洪水、地震等)下具有脆弱性^[3], 这也凸显了其服务的局限性。相比之下, 卫星网络凭借其全球覆盖和应对自然灾害的强抗毁性, 在应急通信、导航定位及补充地面网络等方面扮演着不可替代的角色^[4-5], 能够为6G全球互联愿景提供关键支撑^[6-7]。长期以来, 卫星网络在星地融合架构中主要被视为中继节点, 这种模式导致即使卫星具备直接处理能力,

大量终端服务请求和遥感数据仍需回传至地面云计算中心进行处理。这不仅引入了显著的处理时延(尤其对于时延敏感任务), 更造成了宝贵星地通信带宽资源的严重浪费, 成为制约天基服务效能提升的关键瓶颈^[8-9]。

移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)理念为解决此问题提供了一种新的思路^[10]。通过将MEC与低时延、大容量的低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星网络相结合, 由此催生了如图1所示的边缘计算卫星(edge computing satellite, ECS)范式。该范式支持将用户任务就近卸载至卫星边缘节点进行实时处理^[11], 能够有效节省回传带宽并降低任务处理时延。

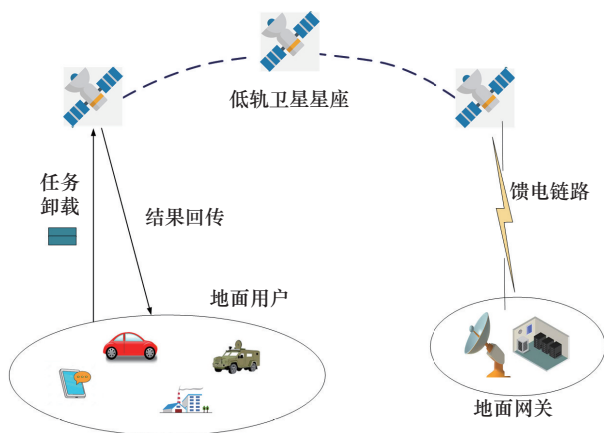


图1 边缘计算卫星架构

在现有开展的研究项目中，国内外已经有一些融入 ECS 设计理念的系统在实际工程应用中展现出卓越性能。例如，2017 年，李德仁院士领衔启动了“通导遥一体化空天信息实时智能服务系统”的战略研究^[14]，旨在突破多星协同观测、星上在轨处理等关键技术，为用户提供高效的空天信息智能服务。2018 年，美国国防部启动了名为“黑杰克（Blackjack）”的 LEO 卫星网络项目^[12]，其开发的“Pit boss”系统利用高效的星载计算资源，实现了对各类数据的实时在轨处理，且该星座项目还支持通过星间链路传输数据，实现星际间的任务协同处理。天仪研究院和北京邮电大学联合研制的“天算星座”卫星实现了在轨遥感图片解析，能够节省 90% 的回传带宽^[13]。2021 年 5 月，中国卫星网络集团有限公司成立，推动了中国星网项目的稳步进展^[15]。上述项目均采用不同的 ECS 系统架构，通过卫星组网形成在轨资源池，能够有效支持天基图像处理、态势感知、星座任务规划等多种应用场景。因此，在新型混合卫星网络系统中，实现卫星任务的在轨卸载和高效计算处理具有重要的战略意义^[16-18]。

然而，现有 ECS 系统及其研究面临一个根本性挑战：单星资源（计算、能源、存储）的严格受限性与任务处理需求的复杂多样性间存在矛盾。单颗卫星的处理能力难以满足日益增长或突发性的复杂任务需求。因此，突破单星限制，实现星座内多星资源的协同调度与任务卸载，成为释放 ECS 系统全部潜能、保障低时延高可靠天基服务的必然选择^[19]。当前，如何在动态、异构、资源受限的卫星星座环境下，设计高效、智能的任务协同卸载机制，以实现负载均衡、时延优化、资源效率最大化等目标，最终提升整体资源利用率与经济性是 ECS 从概

念验证迈向大规模实用化亟待解决的核心科学问题，也是提升天基服务竞争力的关键所在^[20]。

1 相关研究综述

目前，针对卫星边缘计算方向的研究正有序展开。

早期研究侧重于利用卫星集群的计算能力，将复杂任务分解为并行子任务。例如，任智源等^[21]利用加权无向图建模编队卫星网络，采用改进粒子群算法优化能耗约束时延，算法核心聚焦任务分解和节点间的协作调度。Wu 等^[22]则聚焦小型卫星集群中具有逻辑约束的多个任务协同调度，其目标是保证任务在截止时间前完成。这类研究奠定了多星协同处理基础，但其模型通常假设任务可完美分解且节点能力相对同质，对卫星资源异构性和任务到达动态性考虑有限。

随着研究深入，学者们开始构建更复杂的模型以捕捉任务依赖、资源限制和网络动态性。Han 等^[4]结合 LEO 与地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）卫星构建集群框架，使用有向无环图（directed acyclic graph, DAG）描述任务依赖，并设计调度算法应对子任务优先级差异和链路带宽变化，强调了任务结构和网络动态特性对卸载决策的影响。国晓博等^[23]采用加权时间拓展图建模，量化计算时延与传输时延，通过二进制粒子群算法求解最优分配，将时延指标显式纳入优化目标。Yin 等^[24]则将该问题建模为混合整数线性规划（mixed-integer linear programming, MILP），利用 Majorize-minimize 技术和拉格朗日对偶分解寻找最低成本方案，展现出精确优化方法在卫星边缘计算（satellite edge computing, SEC）卸载中的应用潜力。文献^[25-26]则分别利用凸优化技术解决时延-能耗联合优化及任务迁移与资源分配子问题，凸显了凸优化在特定问题形式下的效率优势。这类研究在建模精细度上取得显著进展，但求解复杂度往往较高，且优化目标多为单次卸载的性能指标（如时延、能耗、成本等）。

另一类研究则侧重于在给定卸载框架下优化具体资源参数以提升系统性能。Fu 等^[27]针对卫星物联网集成 MEC 场景，联合优化 CPU 频率、任务分配、终端功率和 MEC 任务比例以最大化上行速率，聚焦通信与计算资源的协同优化。Li 等^[28]则将服务请求调度与部署联合建模为 MILP 问题，主要关注服务实例的放置与请求的匹配。这类研究深化了对资源细粒度调优的理解，但其优化目标通常是局部或短期的性能指标（如单次请求速率、特定服务的部署成本），进而使用开源 OPTI 求解器找到了

解决方案。

然而，上述研究虽在卫星边缘计算任务卸载的策略设计、模型构建和优化方法上取得了显著成果，但其主要集中于保障任务完成（如满足截止时间、降低总时延/能耗）或提升局部/短期资源效率（如单次卸载成本、上行速率），对卫星星座层面的长期、全局性负载均衡问题普遍关注不足。卫星计算资源的异构性和任务到达的时空随机性，极易导致星座内负载分布不均：任务密集区域的卫星长期处于高负载运行状态，其CPU等关键组件持续高速运转，不仅可能引发性能瓶颈，更会显著缩短卫星使用寿命。因此，如何在高度动态、资源受限且异构的卫星星座环境下，设计一种能够实现全局性负载均衡的任务卸载机制，成为提升SEC系统可持续性、鲁棒性与资源利用效率的关键挑战，也是现有研究急需填补的空白。

基于此，本文将以负载均衡作为核心优化目标，聚焦卫星网络的动态特性和资源异构特性，探索高效的任务卸载决策框架与优化算法，旨在弥补现有研究在长期全局负载优化方面的不足。

2 问题模型构建

在图1所示的边缘计算卫星架构中，地面网关被设定为系统的全局控制中心，负责持续监测星座中的各卫星状态和任务处理信息，并根据收集到的信息直接做出相应任务卸载决策。星座中的所有卫星集合表示为 $V = \{v_1, \dots, v_i, \dots, v_N\}$ ，其中， N 代表卫星数量。各卫星节点接收到来自地面用户上传的任务请求和任务数据后，可以选择在本星进行本地计算处理，也可以通过星间链路（inter-satellite link, ISL）传输至其他卫星节点进行处理。

由于地表用户密度存在差异，各卫星在其覆盖区域内接入的用户数量可能不同。为凸显这一特征，假设星座中所有卫星接收到的任务数量服从正态分布。当卫星星座接收到任务后，地面云中心将根据各卫星的计算性能和任务负载状况将各任务分配给合适的卫星节点进行处理。

与现有通用的任务建模相似^[29]，假设卫星 i 接收到的任务数量为 g_i ，卫星任务的输入数据量为 D ，计算复杂度为 ε 。从卫星 i 迁移至卫星 j 的任务表示为 b_i^j ，在卫星 j 上进行处理的业务数量表示为 $\text{Task}_j = \sum_{i=0}^N b_i^j$ 。

由于不同卫星的生产厂商和批次存在差异，其存储资源和CPU处理能力也各不相同。因此，在任务调度过

程中，维持各卫星的资源负载相对均衡是至关重要的。系统既需避免某些卫星因过度空闲而导致资源闲置，也要防止其他卫星因任务过载而一直处于高负荷运行状态。

使用 $Q^j = \frac{\text{Task}_j \times \varepsilon}{f^j}$ 表示卫星 j 的计算资源负载状态，

其中 f^j 表示卫星 j 的CPU可用计算性能。计算性能强的卫星总是希望获得更多的待处理任务以达到资源负载平衡。那么待所有卫星节点将任务卸载后，整个星座的资源负载均衡状态可定义为：

$$\text{Load} = \frac{\sqrt{(Q^1 - Q^{\text{ave}})^2 + (Q^2 - Q^{\text{ave}})^2 + \dots + (Q^N - Q^{\text{ave}})^2}}{N} \quad (1)$$

其中， $Q^{\text{ave}}(t)$ 表示任务被卸载后的所有卫星平均资源使用状况。通过标准差的定义，能够有效衡量星座中各卫星资源负载的均衡程度。负载均衡值越小表示各卫星使用情况越趋向于理想的均衡状态，能够保证卫星在轨资源池的有效利用。

因此，相应的优化目标可定义为在卫星边缘计算系统工作下，构建星座负载均衡的最小化问题建模，其中，最小负载受约束于：

$$\text{Task}_j = \sum_{i=0}^N b_i^j, \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} b_i^j \leq g_i, \forall i \in N \quad (3)$$

约束条件(2)表明每颗卫星 j 需执行的计算任务数量等于其他卫星卸载至该卫星的任务总和；约束条件(3)确保了每颗卫星 i 下的被卸载用户任务不能超过卫星 i 接收的任务数量。

3 算法介绍

3.1 萤火虫群优化算法

萤火虫群优化（glowworm swarm optimization, GSO）算法是一种仿生智能算法，被广泛应用于资源调度问题求解中^[30]。该算法由印度学者Krishnanand等提出，主要模拟萤火虫根据个体亮度而相互吸引的行为。在GSO算法中，每个萤火虫所在位置均为待求问题的可行解。萤火虫的荧光素值对应待求问题的适应度函数值，荧光素值越高（即亮度越大）表明适应度函数值越高。在解空间中，每个萤火虫会向周边更亮的萤火虫移动。

假设萤火虫的群体为 Θ ，其中第 i 只萤火虫所在的位置为 x_i 。萤火虫的荧光素更新公式如下：

$$l_i(t+1) = (1 - \rho)l_i(t) + \gamma f(x_i(t+1)) \quad (4)$$

其中, $l_i(t)$ 为第 t 代第 i 只萤火虫的荧光素值, $f(x_i(t+1))$ 是对应的适应度函数值; $x_i(t+1)$ 为第 $t+1$ 代萤火虫的位置; ρ 为荧光素的消失率; γ 为荧光素更新率。

每只萤火虫会在自身视野范围内寻找其他萤火虫, 视野大小是可以动态改变的, 其更新公式为:

$$R_d^i(t+1) = \min \left\{ R, \max \left\{ 0, R_d^i(t) + \beta (n_t - |N_i(t)|) \right\} \right\} \quad (5)$$

其中, $R_d^i(t+1)$ 表示第 $t+1$ 代第 i 只萤火虫的视野半径; R 表示径向传感器范围; n_t 表示相邻萤火虫个数的阈值; β 表示控制比例常数; $N_i(t) = \{ j: \|x_j(t) - x_i(t)\| < R_d^i(t); l_j(t) < l_i(t) \}$ 表示领域内萤火虫的数目。

在萤火虫群体中, 萤火虫总是向亮度更大的萤火虫位置移动, 即荧光素值越高, 吸引其他萤火虫移动的概率就越大。选择概率公式如下:

$$P_j^i(t) = \frac{(l_j(t) - l_i(t))}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad (6)$$

萤火虫移动后的位置更新公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \frac{s_t(x_j(t) - x_i(t))}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \quad (7)$$

其中, s_t 是移动步长; $\|x_j(t) - x_i(t)\|$ 是萤火虫 i 和萤火虫 j 之间的欧氏距离。

3.2 改进萤火虫群优化算法

传统 GSO 算法在解决高维优化问题时易陷入局部最优, 且收敛速度受限。本文通过引入以下三重机制对该问题进行改进:

- 混沌初始化: 利用混沌序列的遍历性增强种群多样性^[31];
- 量子行为机制: 引入量子态叠加和坍塌特性, 扩大搜索空间^[32];
- 自适应变异: 动态调整变异概率, 平衡探索与开发能力。

(1) 混沌初始化

混沌初始化 Logistic 映射是指利用 Logistic 映射产生的混沌序列对算法的初始种群进行初始化, 从而增强算法的随机性和多样性, 提高算法的全局搜索能力和收敛速度。采用 Logistic 映射生成初始种群的公式如下:

$$\begin{cases} z_{k+1} = \mu z_k(1 - z_k) \\ x_i^j = lb + z_i^j \times (ub - lb) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\mu=4$ (混沌参数), $z_i^j \in (0,1)$ 为第 i 只萤火虫的第 j 维

决策变量的混沌序列, ub 、 lb 为萤火虫位置空间边界。

(2) 量子行为机制

引入量子位编码和概率坍塌机制, 将萤火虫位置从经典坐标扩展为量子态, 进一步提升多样性。量子态叠加使单次迭代能够探索的解空间呈指数级增长。

量子编码表示为:

$$\psi_i = \bigotimes_{j=1}^D (\alpha_i^j |0\rangle + \beta_i^j |1\rangle), |\alpha_i^j|^2 + |\beta_i^j|^2 = 1 \quad (9)$$

量子坍塌将观测由量子态转化为经典解:

$$x_i^j = \begin{cases} lb + |\alpha_i^j|^2 \times (ub - lb), \text{rand} \leq |\alpha_i^j|^2 \\ \text{随机数, 其他} \end{cases} \quad (10)$$

再引入量子旋转角动态调整荧光素, 更新公式为:

$$l_i(t+1) = (1 - \rho)l_i(t) + \gamma f(x_i(t+1)) + \Delta\theta_i \quad (11)$$

其中, $\Delta\theta_i = \eta(1 - e^{-\frac{\gamma}{T}})$ 为量子旋转角增量 (η 为学习率, 取值过大会导致算法错失最优解, 取值过小会导致算法收敛速度较慢, 结合文献[32]及多次独立仿真试验结果, η 取值为 0.05)。

(3) 自适应变异

变异概率随迭代进程自适应调整, 公式如下:

$$P_i = 0.2 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (12)$$

其中, t 为当前迭代数, T 为算法总迭代次数。变异操作采用量子非门 $[\alpha_i^j, \beta_i^j] \rightarrow [\beta_i^j, \alpha_i^j]$ 。该自适应变异机制使变异概率随迭代次数增长逐步降低, 既保障了算法前期的探索寻优性能和收敛速度, 也提升了算法后期搜索最优解的精确性。

改进萤火虫群优化 (CQ-GSQ) 算法具体步骤如算法 1 所示。

算法 1: CQ-GSO 算法步骤

输入: 算法初始参数, 卫星边缘计算场景参数

1. 算法初始化, 定义萤火虫集群的起始位置;
2. 根据式(8)初始化各萤火虫的位置, 基于式(11)计算各萤火虫移动前的荧光素值, 以最小负载作为适应度函数, 荧光素值取适应度函数值的倒数, 以保证最小负载结果越低, 式(4)荧光素值越大;
3. 萤火虫在视野范围内寻找较高荧光素值的萤火虫组成领域集合, 以式(9)和(10)概率选择移动方向;
4. 萤火虫基于式(11)更新荧光素值, 其中自适应变异概率选择遵循式(12);
5. 判断是否达到最大迭代次数: 若达到, 输出最优解; 否则返回步骤 3 继续迭代。

仿真场景参数设置参考文献[33], 卫星星座参考66颗星的铱星NEXT星座, 所有卫星接收的计算任务数量服从均值1~6, 标准差为0.5~2.5的正态分布, 每个计算任务的输入数据量为 $I = 30 \text{ MB}$, 计算所需转数 $J = 2 \times 10^3 \text{ CPU cycle/MB}$ 。每颗卫星的计算能力 f^j 在每秒2~6 GHz之间取随机数。算法参数设置参考文献[34], 其中各参数的参考取值为: $\rho = 0.4$ 、 $\beta = 0.08$ 、 $\gamma = 0.6$ 、 $s_t = 0.03$ 。仿真采用Python编程语言实现, 实验结果通过30次独立仿真取均值进行统计分析。

4 仿真试验与分析

本节将对所提算法进行仿真试验。粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法和麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA) 作为经典的优化算法被广泛应用于求解资源调度问题, 本文将其引用为基准算法进行参考[35-36]。同时, 为验证本文所提优化策略的有效性, 基础GSO算法也将作为基准算法进行对比。

首先对本文所提CQ-GSO算法以及上述3种智能算法的收敛特性进行仿真分析。4种算法的收敛曲线如图2所示。由图2可知, 几种算法在迭代前期都具有良好的收敛速度。而当算法逐步趋于稳定后, CQ-GSO算法由于引入了三重优化机制, 能够更高效探索到更精准的更优解。因此, CQ-GSO算法也能够为计算卸载问题获取更低的负载均衡值。

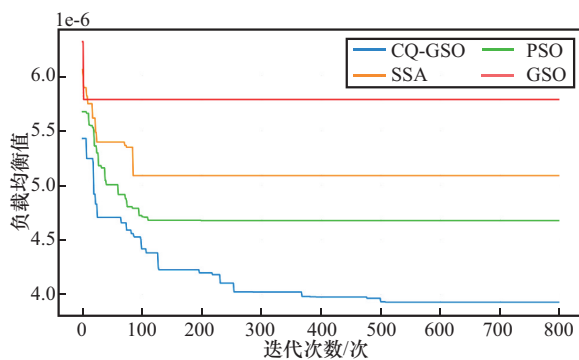


图2 算法收敛曲线

同时, 各算法多组试验仿真结果浮动范围分布以箱式图呈现, 如图3所示。箱式图内横线表示试验结果的中位数。CQ-GSO算法在负载均衡性能上显著优于对比算法, 其中中位数(3.7)较PSO、SSA分别降低25.5%、14%, 且具有相对较小的四分位距(interquartile range, IQR), 一定程度上体现了其在卫星边缘计算场景中的性

能优越性和稳定性。

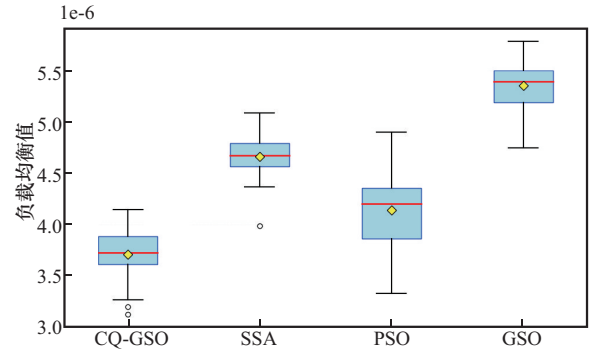


图3 算法性能分布箱式图

此外, 本文统计了各算法800次迭代收敛至最优解所需耗时, 如图4所示。结果显示, CQ-GSO、SSA与PSO的计算效率相近, 而GSO耗时更长。在优先计算效率且可适度接受任务卸载决策质量妥协的场景下, SSA或PSO也可以作为替代选择。

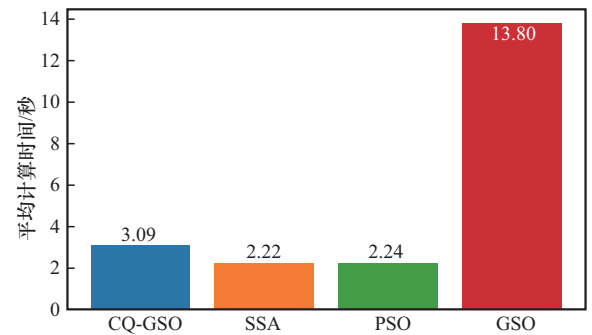


图4 算法计算时间对比

进一步, 通过改变正态分布的平均值来模拟卫星边缘计算中接入的平均任务数量对负载均衡的影响。由图5可知, 随着任务数量的增多, 各算法的负载均衡值均呈现增长趋势。这是因为任务数量增多, 每颗卫星的工作负载都会有相应的增长。CQ-GSO算法相较于其他算法, 由于其优异的性能始终维持最低的负载均衡值。

最后, 改变正态分布的标准差以模拟卫星边缘计算中各卫星接入任务数量的差异程度。任务数量标准差越大表明卫星间接收的任务数量越不均衡。如图6所示, 随着标准差的增大, 各算法的负载均衡值均有一定程度的增长。但各算法的优化目标都是求取最优的负载均衡值, 因此各算法随着标准差变化的波动较小。相较于其他3种算法, CQ-GSO算法仍然维持较优表现。

综上分析, 本文所提CQ-GSO算法对于解决卫星边

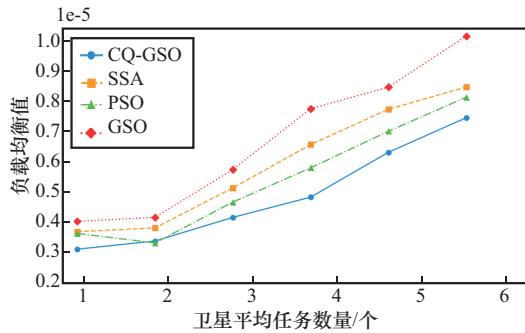


图5 卫星平均任务数量对负载均衡值的影响 (标准差=1.5)

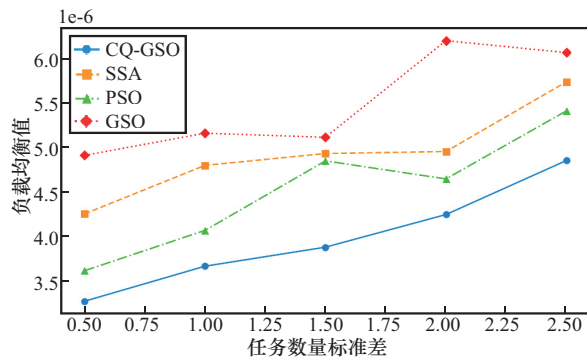


图6 任务数量标准差对负载均衡值的影响 (均值=3)

缘计算中任务卸载带来的负载均衡问题具有良好性能。

5 结束语

卫星边缘计算是未来空天地一体化信息网络发展的关键技术之一。本文以卫星边缘计算任务卸载产生的负载均衡问题为研究对象, 将其建模为数学优化问题, 并在传统 GSO 算法的基础上提出三重优化机制方案进行求解。仿真分析验证了所提算法对于求解最优负载均衡值具备良好的性能表现。在未来的研究工作中, 需进一步结合具体任务优先级、QoS 偏好等属性, 设计更为详细的卸载策略; 同时, 结合 Starlink 等大型低轨星座进行研究分析也是值得探索的重要方向。

参考文献

- [1] KRYLOVSKIY A, JAHN M, PATTI E. Designing a smart city Internet of things platform with microservice architecture[C]//Proceedings of the 2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud. Piscataway: IEEE Press, 2015: 25-30.
- [2] SU X D, SHAO G F, VAUSE J, et al. An integrated system for urban environmental monitoring and management based on the Environmental Internet of Things[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2013, 20(3): 205-209.

- [3] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [4] HAN J R, WANG H P, WU S J, et al. Task scheduling of high dynamic edge cluster in satellite edge computing[C]//Proceedings of the 2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES). Piscataway: IEEE Press, 2020: 287-293.
- [5] ZHANG P Y, ZHANG Y, KUMAR N, et al. Dynamic SFC embedding algorithm assisted by federated learning in space-air-ground-integrated network resource allocation scenario[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(11): 9308-9318.
- [6] ZHEN L, BASHIR A K, YU K P, et al. Energy-efficient random access for LEO satellite-assisted 6G Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5114-5128.
- [7] SAEED N, ALMORAD H, DAHROUJ H, et al. Point-to-point communication in integrated satellite-aerial 6G networks: state-of-the-art and future challenges[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 1505-1525.
- [8] WANG F, JIANG D D, QI S, et al. A dynamic resource scheduling scheme in edge computing satellite networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2021, 26(2): 597-608.
- [9] LI Q, WANG S G, MA X, et al. Service coverage for satellite edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 695-705.
- [10] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al. Mobile edge computing: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 450-465.
- [11] LENG T, LI X Y, HU D W, et al. Collaborative computing and resource allocation for LEO satellite-assisted Internet of Things[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, 2021(1): 4212548.
- [12] 中国航天编辑部. 美国国防高级研究计划局年底开始发“黑杰克”卫星[J]. 中国航天, 2020(6): 76.
CHINA AEROSPACE EDITORIAL DEPARTMENT. The defense advanced research projects agency of the United States began to send “Black Jack” satellites at the end of the year[J]. Aerospace China, 2020(6): 76.
- [13] 自动化博览编辑部. 华为云“云边一体”方案首次在太空验证, 提升“天算星座”复杂任务能力[J]. 自动化博览, 2022, 39(2): 6.
AUTOMATION PANORAMA EDITORIAL DEPARTMENT. Huawei cloud’s “cloud edge integration” scheme was verified in space for the first time, which improved the complex task ability of “celestial constellation”[J]. Automation Panorama, 2022, 39(2): 6.
- [14] 李德仁. 论军民深度融合的通导遥一体化空天信息实时智能服务系统[J]. 网信军民融合, 2018, (12): 12-5.
LI D R. On the real-time intelligent service system for integrated aerospace information of communication, navigation and remote control with deep integration of military and civilian sectors [J].

- Civil-Military Integration on Cyberspace, 2018, (12): 12-5.
- [15] 祁超. 卫星互联网发展现状及政策分析[J]. 电信快报, 2023(8): 35-38.
- QI C. Development status and policy analysis of satellite Internet [J]. Telecommunications Information, 2023(8): 35-38.
- [16] 王丰. 面向动态可持续的天地一体化融合通信关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- WANG F. Research on key technologies of dynamic and continuous space-terrestrial integrated communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [17] 赵菲, 吕焜哲, 孙浩, 等. 基于卫星通导遥融合的实时信息服务研究[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(4): 1-10.
- ZHAO F, LYU Y Z, SUN H, et al. Research of real-time information service based on fusion of communication, navigation and remote sensing satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(4): 1-10.
- [18] 郑作亚, 薛庆昊, 仇林遥, 等. 基于网络信息体系思维的天地一体通导遥融合应用探讨[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 709-714.
- ZHENG Z Y, XUE Q H, QIU L Y, et al. Discussion on integration application of communication navigation remote-sensing with the idea of network information system of system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(8): 709-714.
- [19] 张雨茹. 低轨卫星网络边缘计算任务卸载策略研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- ZHANG Y R. Research on edge computing task offloading strategy for low earth orbit satellite networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [20] 徐琬玥. 低轨卫星通信网络边缘计算研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- XU W Y. Research on edge computing of low earth orbit satellite communication network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [21] 任智源, 侯向往, 郭凯, 等. 分布式卫星云雾网络及时延与能耗策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1474-1481.
- REN Z Y, HOU X W, GUO K, et al. Distributed satellite cloud-fog network and strategy of latency and power consumption[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(8): 1474-1481.
- [22] WU J, LIU L X, HU X H. A robust algorithm for deadline-constrained task scheduling in small satellite clusters[C]//Proceedings of the 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1769-1774.
- [23] 国晓博, 任智源, 程文驰, 等. 低轨卫星网络中业务图驱动的星间协作计算方案[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 35-44.
- GUO X B, REN Z Y, CHENG W C, et al. Inter-satellite cooperative computing scheme driven by business graph in LEO satellite network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 35-44.
- [24] YIN Y B, HUANG C H, WU D F, et al. Joint computation offloading and resource allocation in space-air-terrestrial integrated networks for IoT Applications[J]. Ad Hoc Networks, 2023, 150: 103267.
- [25] DONG F H, HUANG T, ZHANG Y S, et al. A computation offloading strategy in LEO constellation edge cloud network[J]. Electronics, 2022, 11(13): 2024.
- [26] 宋政育, 郝媛媛, 孙昕. 低轨卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法[J]. 电子学报, 2022, 50(3): 567-573.
- SONG Z Y, HAO Y Y, SUN X. Computation offloading and resource allocation algorithm for collaborative LEO satellite multi-access edge computing[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(3): 567-573.
- [27] FU J F, HUA J Y, WEN J G, et al. Optimization of achievable rate in the multiuser satellite IoT system with SWIPT and MEC[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 2072-2080.
- [28] LI C C, ZHANG Y S, HAO X K, et al. Jointly optimized request dispatching and service placement for MEC in LEO network[J]. China Communications, 2020, 17(8): 199-208.
- [29] VAN LE D, THAM C K. Quality of service aware computation offloading in an ad-hoc mobile cloud[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8890-8904.
- [30] KRISHNANAND K N, GHOSE D. Glowworm swarm optimisation: a new method for optimising multi-modal functions[J]. International Journal of Computational Intelligence Studies, 2009, 1(1): 93.
- [31] ALATAS B. Chaotic harmony search algorithms[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 216(9): 2687-2699.
- [32] SUN J, FANG W, WU X J, et al. Quantum-behaved particle swarm optimization: analysis of individual particle behavior and parameter selection[J]. Evolutionary Computation, 2012, 20(3): 349-393.
- [33] 李诚成, 张亚生, 孙晨华. 低轨卫星互联网星载边缘计算卸载策略[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 401-407.
- LI C C, ZHANG Y S, SUN C H. Computation offloading for satellite-based edge computing in LEO satellite network[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(3): 401-407.
- [34] 顾桓瑜, 石磊, 郭俊廷. 基于改进萤火虫算法的云计算负载均衡研究[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(6): 107-110, 116.
- GU H Y, SHI L, GUO J T. Load balancing for cloud computing based on improved glowworm swarm algorithm[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(6): 107-110, 116.
- [35] 李华. 基于改进GA算法的城市施工智能规划管理系统优化设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(3): 127-130.

LI H. Optimization design of intelligent planning management system for urban construction based on improved GA algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2024(3): 127-130.

- [36] 吕鑫, 慕晓冬, 张钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712-1720.

LYU X, MU X D, ZHANG J, et al. Chaos sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1712-1720.

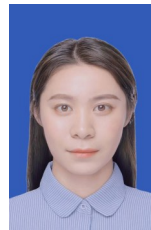
[作者简介]



乐恒志 (1994-), 男, 中国人民解放军 91977 部队工程师, 主要研究方向为卫星通信、数据链等。



李悦 (1977-), 女, 中国人民解放军 91977 部队正高级工程师, 主要研究方向为通信系统、卫星通信等。



袁一卿 (2000-), 女, 中国人民解放军 91977 部队助理工程师, 主要研究方向为通信系统。