

低轨卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法

宋政育¹,郝媛媛^{2,3},孙 昕¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044; 2. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部,北京 100094;
3. 国家航天局卫星通信系统创新中心,北京 100094)

摘 要: 研究了基于星间链路的低轨卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配问题,为偏远地区用户提供边缘计算服务. 采用部分任务迁移机制,以地面用户加权总能耗最小化为目标建立优化问题,提出了一种低轨卫星协作边缘计算的任务迁移和资源分配算法,基于优化问题的非凸性,将其分解为任务迁移子问题和资源分配子问题,分别采用标准凸优化方法和拉格朗日对偶分解方法进行求解. 仿真结果表明,该算法的收敛速度快;与本地计算和任务数据全部上传算法相比,本文所提出的算法可至少降低约74%的用户总能耗;与非协作卫星边缘计算相比,基于星间链路的低轨卫星协作边缘计算可至少降低约22%的用户总能耗,且星间链路的信道容量越大,用户总能耗越低.

关键词: 卫星通信; 协作边缘计算; 星间链路; 任务迁移; 资源分配; 加权总能耗

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)03-0567-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201249

Computation Offloading and Resource Allocation Algorithm for Collaborative LEO Satellite Multi-Access Edge Computing

SONG Zheng-Yu¹, HAO Yuan-Yuan^{2,3}, SUN Xin¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. Innovation Center of Satellite Communication System, China National Space Administration, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to provide edge computing services for users in remote regions, the computation offloading and resource allocation problem for collaborative low-earth orbit (LEO) satellite multi-access edge computing (MEC) with the aid of inter-satellite link (ISL) is investigated. By applying the partial offloading scheme, the optimization problem is formulated to minimize the weighted sum energy consumption of ground users, and a computation offloading and resource allocation algorithm for LEO satellite collaborative MEC is proposed. Due to the non-convexity of the formulated problem, it is decoupled into computation offloading and resource allocation subproblems, and then solved by standard convex optimization and Lagrangian dual decomposition method, respectively. Simulation results show that the proposed algorithm converges fast. Compared with local computing and full offloading algorithms, the proposed algorithm can reduce the energy consumption of users by 74% at least. Additionally, compared with non-collaborative satellite MEC, LEO satellite collaborative MEC based on the ISL can reduce the energy consumption of users by 22% at least. By increasing the capacity of ISL, the energy consumption of users is continuously decreased.

Key words: satellite communications; collaborative edge computing; inter-satellite link; computation offloading; resource allocation; weighted sum energy consumption

1 引言

近年来,为了满足移动通信和物联网的大计算量、低时延应用的需求,并降低移动终端的能耗,欧洲通信标准化委员会提出了多接入边缘计算(Multi-Access

Edge Computing, MEC)技术^[1]. 在缺乏地面通信基础设施的偏远地区,可在低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星中部署 MEC 服务器,为偏远地区的用户提供高质量的边缘计算服务^[2]. 为了充分发挥 MEC 技术在降低移动

终端能耗和计算时延等方面的优势,必须采用高效的
任务迁移以及通信和计算资源分配算法^[3,4]. 现有的任
务迁移及资源分配算法一般基于凸优化理论设计,还
有部分文献采用启发式算法. 文献[5]设计了基于时分
多址接入和正交频分多址接入的两种多用户 MEC 模
型,在计算任务时延的约束下,基于凸优化理论提出了
使用户能耗加权和最小的任务迁移和资源分配算法.
文献[6]则采用凸优化方法设计了一种统计性的通信
和计算资源分配算法,使移动设备和 MEC 服务器的长
期平均功率最小化. 文献[7]研究了异构 MEC 网络的
能耗和时延的折中优化问题. 当用户数量或计算任务
较多时,MEC 服务器容易发生超载现象. 为了解决该
问题,可在系统中部署多个 MEC 服务器,各 MEC 服务
器可进行边缘计算协作. 文献[8]基于遗传算法和粒子
群优化方法,研究了密集部署的小蜂窝网络 MEC 服
务器的选择和通信资源分配问题,其中每个小蜂窝基
站均可部署 MEC 服务器并进行协作边缘计算. 文献
[9]将小蜂窝基站的部分任务数据迁移至部署于宏蜂
窝基站且计算能力更强的 MEC 服务器,实现 MEC 服
务器间的协作边缘计算. 上述文献仅研究了地面通
信网络的边缘计算问题,所提出的任务迁移和资源分
配算法不适用于卫星通信网络.

目前,针对卫星通信网络边缘计算的研究比较有
限. 文献[10]首次提出了星地一体化网络的 MEC 技
术,由于 LEO 卫星与地面之间的信号传播时延最低可
达到 1~4 ms,MEC 技术可用于星地一体化网络. 文
献[11]提出了一种星地一体化的边缘计算网络架构,
并分析了该网络架构面临的技术挑战. 文献[12]研究
了一种空地一体化的边缘计算系统,并提出了基于机
器学习的最优任务迁移策略. 上述卫星边缘计算的算
法均未考虑卫星间的协作问题.

本文通过 LEO 卫星通信网络的星间链路^[13](Inter-
Satellite Link, ISL)进行任务数据的二次迁移,实现相
邻卫星间的边缘计算协作. 以地面移动用户的加权总
能耗最小化为目标,在保证任务时延需求的条件下,提
出一种基于 ISL 的 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移
和资源分配算法. 仿真结果表明,该算法的收敛速度
快;与本地计算和任务数据全部上传算法相比,本文
所提出的算法的用户总能耗更低;与非协作边缘计算
相比,基于 ISL 的 LEO 卫星协作边缘计算可有效降
低用户能耗,且随着 ISL 的信道容量和 MEC 服务器
计算能力的增加,用户的总能耗不断降低.

2 系统模型与优化问题

2.1 系统模型

设某 LEO 卫星协作边缘计算系统有 M 个地面移

动用户、 N 个 LEO 卫星以及 K 个正交子载波. 在某
LEO 卫星的覆盖范围内,采用部分任务迁移机制,通
过正交频分多址接入同时将 M 个用户的部分或全部
任务数据迁移至卫星 MEC 服务器进行边缘计算,移动
用户在本地对未被迁移至卫星的任务数据进行计算.
假定移动用户的 CPU 采用动态电压和频率调整技
术^[8],则任意用户 m 进行任务数据的本地计算所需
的功率为:

$$P_m^{\text{LC}} = \kappa f_m^3 \quad (1)$$

其中: κ 为一个与 CPU 架构有关的常数; f_m 为用户 m
的进行本地计算时的 CPU 时钟频率.

设用户 m 计算任务的总数据量为 η_m ,用户 m 向
LEO 卫星迁移的数据量为 S_m ,二者的单位均为比特,则
用户 m 进行本地计算所需的时间为:

$$T_m^{\text{LC}} = \frac{(\eta_m - S_m)\beta}{f_m} \quad (2)$$

其中, β 为计算每比特任务数据所需的 CPU 周期数.

用户 m 进行本地计算所需的能量可表示为:

$$E_m^{\text{LC}} = P_m^{\text{LC}} T_m^{\text{LC}} = \kappa (\eta_m - S_m) \beta f_m^2 \quad (3)$$

设 ρ_{mk} 为子载波分配指示变量,当子载波 k 分配给
用户 m 时, $\rho_{mk} = 1$,否则 $\rho_{mk} = 0$,则:

$$S_m = \sum_{k=1}^K \rho_{mk} S_{mk} \quad (4)$$

当任务数据迁移时,用户 m 在子载波 k 上的数据速
率可表示为:

$$r_{mk} = B_0 \log_2 \left(1 + \frac{P_{mk} h_{mk}}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

其中, P_{mk} 与 h_{mk} 分别为用户 m 在子载波 k 上的发射功
率和信道增益; B_0 为子载波带宽; σ^2 为加性高斯白噪
声的功率.

用户 m 进行任务迁移的总数据速率为:

$$R_m = \sum_{k=1}^K \rho_{mk} r_{mk} \quad (6)$$

用户 m 进行任务迁移所需的总功率为:

$$P_m = \sum_{k=1}^K \rho_{mk} P_{mk} \quad (7)$$

用户 m 进行任务迁移所需的能量为:

$$E_m^{\text{TX}} = P_m T_{\text{tx}} = \sum_{k=1}^K \rho_{mk} P_{mk} T_{\text{tx}} \quad (8)$$

其中: T_{tx} 为各用户任务数据迁移时的传输时间.

假定 N 个 LEO 卫星中任意两个相邻的卫星间可通
过 ISL 进行边缘计算协作. 设地面移动用户接入卫星
 n ,当卫星 n 的计算能力不足时,可将部分任务数据迁
移至相邻卫星 j 的 MEC 服务器进行协作计算. 设卫星
 n 通过 ISL 迁移至相邻卫星 j 的数据量为 D ,卫星 n 和卫星

j 的 MEC 服务器计算时的 CPU 时钟频率分别为 f_n^{EC} 和 f_j^{EC} , 则二者进行边缘计算的时间分别为:

$$T_n^{\text{EC}} = \frac{\left(\sum_{m=1}^M S_m - D \right) \beta}{f_n^{\text{EC}}} \quad (9)$$

$$T_j^{\text{EC}} = \frac{D\beta}{f_j^{\text{EC}}} \quad (10)$$

设 ISL 的信道容量为 C , 则卫星通过 ISL 迁移任务数据所产生的时延为:

$$T^{\text{ISL}} = \frac{D}{C} \quad (11)$$

任务数据计算结果的数据量很小, 用户下载结果的时间可忽略. 由于星地之间距离较远, 不可忽略信号自由空间传播时延. 假定 LEO 卫星 n 的高度为 H_n , 光速为 c , 则地面用户与卫星 n 之间的信号自由空间传播时延可近似表示为:

$$T_n^{\text{trip}} = \frac{2H_n}{c} \quad (12)$$

LEO 卫星进行协作边缘计算的总时延为:

$$T_{\text{sat}} = T_n^{\text{trip}} + \max \left\{ T_n^{\text{EC}}, T^{\text{ISL}} + T_j^{\text{EC}} \right\} \quad (13)$$

2.2 优化问题

本文对 LEO 卫星协作边缘计算系统的任务迁移策略以及通信和计算资源分配进行优化, 其中通信资源包括各用户的发射功率、用户与卫星间的子载波以及任务迁移的时间; 计算资源指用户进行本地计算时的 CPU 时钟频率. 以所有用户的加权总能耗最小化为目标, 以任务的可容忍时延等为约束条件建立优化问题, 则该优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min_{f, \rho, p, s, D, T_{\text{tx}}} \quad & \sum_{m=1}^M w_m (E_m^{\text{LC}} + E_m^{\text{TX}}) \\ \text{s.t. C1:} \quad & f_m \leq f_m^{\text{max}}, \forall m, \\ \text{C2:} \quad & P_m \leq P_m^{\text{max}}, \forall m, \\ \text{C3:} \quad & T_m^{\text{LC}} \leq T, \forall m, \\ \text{C4:} \quad & T_{\text{tx}} + T_{\text{sat}} \leq T, \\ \text{C5:} \quad & S_m \leq \alpha_m, \forall m, \\ \text{C6:} \quad & s_{mk} \geq 0, \forall m, k, \\ \text{C7:} \quad & \sum_{m=1}^M \rho_{mk} \leq 1, \forall m, \\ \text{C8:} \quad & \rho_{mk} \in \{0, 1\}, \forall m, k. \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{f}=(f_m)$, $\boldsymbol{\rho}=(\rho_{mk})$, $\mathbf{p}=(p_{mk})$, $\mathbf{s}=(s_{mk})$. f_m^{max} 和 P_m^{max} 分别为用户 m 的 CPU 最大时钟频率和最大发射功率. T 为计算任务可容忍的最大时延. w_m 为权重参数, 用于表示用户的优先级. 约束条件 C3 和 C4 表示用户进行本地计算和边缘计算的时延均不能超过任务可容忍的最大时延. C7 和 C8 表示系统中每个子载波最多可分配给一个用户.

3 任务迁移和资源分配算法

3.1 ISL 迁移的最优数据量

为了设计 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法, 需要确定相邻卫星间通过 ISL 迁移的最优数据量, 可得优化问题的相关定理.

定理 1 优化问题式(14)的目标函数为关于 T_{tx} 的单调递减函数.

证明 由式(5)可得:

$$p_{mk} = \frac{\sigma^2}{h_{mk}} \left(2^{\frac{r_{mk}}{B_0}} - 1 \right) = \frac{\sigma^2}{h_{mk}} \left(2^{\frac{s_{mk}}{B_0 T_{\text{tx}}}} - 1 \right) \quad (15)$$

将优化问题式(14)的目标函数转换为:

$$E = \sum_{m=1}^M w_m \left(\kappa (\eta_m - S_m) \beta f_m^2 + \sum_{k=1}^K \frac{\rho_{mk} T_{\text{tx}} \sigma^2}{h_{mk}} \left(2^{\frac{s_{mk}}{B_0 T_{\text{tx}}}} - 1 \right) \right) \quad (16)$$

对目标函数 E 求关于 T_{tx} 的导数, 可得:

$$\frac{\partial E}{\partial T_{\text{tx}}} = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{w_m \rho_{mk} \sigma^2}{h_{mk}} \left(2^{\frac{s_{mk}}{B_0 T_{\text{tx}}}} \left(1 - \frac{s_{mk}}{B_0 T_{\text{tx}}} \ln 2 \right) - 1 \right) \quad (17)$$

为证明 E 为关于 T_{tx} 的单调递减函数, 需证明

$$\frac{\partial E}{\partial T_{\text{tx}}} < 0. \text{ 定义 } f(r_{mk}) = 2^{\frac{r_{mk}}{B_0}} \left(1 - \frac{r_{mk}}{B_0} \ln 2 \right) - 1, \text{ 则可得}$$

$$\frac{\partial E}{\partial T_{\text{tx}}} = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{w_m \rho_{mk} \sigma^2}{h_{mk}} f(r_{mk}). \text{ 对函数 } f(r_{mk}) \text{ 求关于}$$

$$r_{mk} \text{ 的导数, 有 } \frac{\partial f(r_{mk})}{\partial r_{mk}} = -2^{\frac{r_{mk}}{B_0}} r_{mk} \left(\frac{\ln 2}{B_0} \right)^2. \text{ 因为 } r_{mk} \geq 0, \text{ 所}$$

$$\text{以 } \frac{\partial f(r_{mk})}{\partial r_{mk}} \leq 0. \text{ 当 } r_{mk} = 0 \text{ 时, 函数 } f(r_{mk}) \text{ 可达最大值, 即}$$

$f(0) = 0$; 当 $r_{mk} > 0$ 时, 则 $f(r_{mk}) < 0$. 若系统中至少一个子载波的数据速率 $r_{mk} > 0$, 则有 $\frac{\partial E}{\partial T_{\text{tx}}} < 0$. 因此, 优化问

题式(14)的目标函数为关于 T_{tx} 的单调递减函数. 对于 $r_{mk} = 0, \forall m, k$ 的特殊情况, 所有的任务数据均由用户在本地进行计算, 此时不需要进行任务迁移和资源分配算法的设计. 证毕.

由定理 1 可知, 为了降低能耗, 用户将以可允许的最大时长迁移任务数据. 因为 $T_{\text{tx}} + T_{\text{sat}} \leq T$, 所以当 T_{sat} 取得最小值时, 用户传输时长 T_{tx} 可达到最大, 此时用户的能耗最低. 根据式(13), 对于卫星 n , T_n^{trip} 为常数, 当 $T_n^{\text{EC}} = T^{\text{ISL}} + T_j^{\text{EC}}$ 时, $\max \left\{ T_n^{\text{EC}}, T^{\text{ISL}} + T_j^{\text{EC}} \right\}$ 取得最小值, 即 T_{sat} 取得最小值.

令 $T_n^{\text{EC}} = T^{\text{ISL}} + T_j^{\text{EC}}$, 则:

$$\frac{\left(\sum_{m=1}^M S_m - D \right) \beta}{f_n^{\text{EC}}} = \frac{D}{C} + \frac{D\beta}{f_j^{\text{EC}}} \quad (18)$$

由式(18)可得, 卫星间通过 ISL 迁移的最优数据量为:

$$D^* = \frac{\beta f_j^{\text{EC}} C \sum_{m=1}^M S_m}{\beta f_j^{\text{EC}} C + \beta f_n^{\text{EC}} C + f_n^{\text{EC}} f_j^{\text{EC}}} \quad (19)$$

将 D^* 代入式 (13), 可得 T_{sat} 的最小值, 即:

$$T_{\text{sat}}^* = T_n^{\text{trip}} + \frac{\left(\sum_{m=1}^M S_m - D^* \right) \beta}{f_n^{\text{EC}}} \quad (20)$$

3.2 任务迁移和资源分配算法设计

由优化问题式 (14) 的约束条件 C1 和 C3, 可得:

$$\frac{(\eta_m - S_m) \beta}{T} \leq f_m \leq f_m^{\text{max}}, \forall m \quad (21)$$

优化问题的目标函数为关于 f_m 的单调递增函数, 由式 (21) 可得 f_m 的最优解, 即:

$$f_m^* = \frac{(\eta_m - S_m) \beta}{T}, \forall m \quad (22)$$

为了保证优化问题的可行性, 由式 (21) 可得:

$$\frac{(\eta_m - S_m) \beta}{T} \leq f_m^{\text{max}}, \forall m \quad (23)$$

则由式 (23) 可得:

$$S_m \geq \eta_m - \frac{T f_m^{\text{max}}}{\beta}, \forall m \quad (24)$$

将式 (20) 和式 (22) 代入式 (14) 中, 优化问题式 (14) 转换为:

$$\begin{aligned} \min_{\rho, p, s, T_{\text{tx}}} E(\rho, p, s, T_{\text{tx}}) \\ = \sum_{m=1}^M w_m \left(\frac{\kappa (\eta_m - S_m)^3 \beta^3}{T^2} + \sum_{k=1}^K \rho_{mk} p_{mk} T_{\text{tx}} \right) \quad (25) \\ \text{s.t. C2, C5-C8,} \\ \text{C9: } T_{\text{tx}} + T_{\text{sat}}^* \leq T \end{aligned}$$

优化问题式 (25) 的目标函数为非凸的, 不易对其直接求解, 故将其分解为任务迁移子问题和无线资源分配子问题, 通过迭代求解子问题, 得到优化问题式 (25) 的解.

若假定子载波分配变量 ρ 已知, 将式 (15) 代入优化问题式 (25), 则可得到任务迁移子问题为:

$$\begin{aligned} \min_{s, T_{\text{tx}}} \sum_{m=1}^M w_m \left(\frac{\kappa \left(\eta_m - \sum_{k=1}^K \rho_{mk} S_{mk} \right)^3 \beta^3}{T^2} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^K \frac{\sigma^2 \rho_{mk} T_{\text{tx}}}{h_{mk}} \left(2^{\frac{S_{mk}}{\beta_0 T_{\text{tx}}}} - 1 \right) \right) \quad (26) \\ \text{s.t. C5, C6, C9,} \\ \text{C10: } \sum_{k=1}^K \frac{\sigma^2 \rho_{mk}}{h_{mk}} \left(2^{\frac{S_{mk}}{\beta_0 T_{\text{tx}}}} - 1 \right) \leq P_m^{\text{max}} \end{aligned}$$

若假定各用户迁移的数据量 S_m 和传输时间 T_{tx} 已知, 且 $S_m = \sum_{k=1}^K s_{mk}^*$, s_{mk}^* 为任务迁移子问题式 (26) 的最优解, 则由优化问题式 (25) 可得到无线资源分配子问题为:

$$\begin{aligned} \min_{\rho, p} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K w_m \rho_{mk} p_{mk} \\ \text{s.t. C2, C7-C8} \quad (27) \end{aligned}$$

$$\text{C11: } \sum_{k=1}^K \rho_{mk} r_{mk} T_{\text{tx}} \geq S_m, \forall m$$

定理 2 任务迁移子问题式 (26) 为凸优化问题.

证明 任务迁移子问题式 (26) 的目标函数的第一项为关于矢量 \mathbf{s} 的凸函数, 第二项符合函数 $tf(x/t) = t \times 2^{x/t}$ 的结构. 由于函数 $tf(x/t) = t \times 2^{x/t}$ 为关于 x 和 t 的联合凸函数, 故优化问题式 (26) 的目标函数为关于 \mathbf{s} 和 T_{tx} 的联合凸函数. 定义函数 $g(\mathbf{s}, T_{\text{tx}}) = \sum_{k=1}^K \sigma^2 \rho_{mk} T_{\text{tx}} \left(2^{S_{mk}/\beta_0 T_{\text{tx}}} - 1 \right) / h_{mk}$, 则约束条件 C10 可等价于 $g(\mathbf{s}, T_{\text{tx}}) - T_{\text{tx}} P_m^{\text{max}} \leq 0$. 因为 $g(\mathbf{s}, T_{\text{tx}})$ 与函数 $tf(x/t) = t \times 2^{x/t}$ 的结构一致, 所以 $g(\mathbf{s}, T_{\text{tx}})$ 为关于 \mathbf{s} 和 T_{tx} 的联合凸函数, 即约束条件 C10 为凸的. 优化问题式 (26) 的其它约束条件均为线性的. 因此, 任务迁移子问题式 (26) 的目标函数和可行集均为凸的, 为凸优化问题. 证毕.

任务迁移子问题式 (26) 为凸优化问题, 则可通过标准凸优化算法 (例如内点法等), 得到其最优解. 对于无线资源分配子问题式 (27), 由于存在整数优化变量, 难以直接获得其最优解, 因此采用拉格朗日对偶分解方法求解.

松弛无线资源分配子问题式 (27) 的约束条件 C2 和 C11, 则其拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} L = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K w_m \rho_{mk} p_{mk} + \sum_{m=1}^M \theta_m \left(\sum_{k=1}^K \rho_{mk} p_{mk} - P_m^{\text{max}} \right) \\ + \sum_{m=1}^M \lambda_m \left(S_m - \sum_{k=1}^K \rho_{mk} r_{mk} T_{\text{tx}} \right) \quad (28) \\ = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \left((w_m + \theta_m) p_{mk} - \lambda_m r_{mk} T_{\text{tx}} \right) \rho_{mk} \\ + \sum_{m=1}^M \lambda_m S_m - \sum_{m=1}^M \theta_m P_m^{\text{max}} \end{aligned}$$

其中, $\theta = (\theta_m)$ 和 $\lambda = (\lambda_m)$ 分别为约束条件 C2 和 C11 的拉格朗日因子. 对偶函数为 $Q(\theta, \lambda) = \min_{\rho, p} L$.

由式 (28) 可知, 对于确定的拉格朗日因子 θ 和 λ , 可将对偶函数 $Q(\theta, \lambda)$ 进一步分解为 K 个独立的子问题, 且每个子问题对应一个子载波. 对应于子载波 k 的子问题可表示为:

$$\min_{\rho_k, p_k} L_k = \sum_{m=1}^M \left((w_m + \theta_m) p_{mk} - \lambda_m r_{mk} T_{\text{tx}} \right) \rho_{mk} \quad (29)$$

定义函数 G_{mk} 和 H_{mk} , 即:

$$G_{mk} = \sum_{m=1}^M \left(w_m + \theta_m \right) p_{mk} - \lambda_m r_{mk} T_{\text{tx}} \quad (30)$$

$$H_{mk} = \min_{p_k} G_{mk} \quad (31)$$

则子载波分配的最优解为:

$$\rho_{mk}^* = \begin{cases} 1, & m = \arg \min_m H_{mk} \\ 0, & \text{其它情况} \end{cases} \quad (32)$$

为了获得 ρ_{mk}^* , 需要通过求解优化问题式(31), 得到 H_{mk} . 求 G_{mk} 关于 p_{mk} 的导数, 并令其为 0, 则有:

$$\frac{\partial G_{mk}}{\partial p_{mk}} = (w_m + \theta_m) - \frac{\lambda_m B_0 T_{\text{tx}} h_{mk}}{(\sigma^2 + p_{mk} h_{mk}) \ln 2} = 0 \quad (33)$$

由式(33)可得, 用户 m 在子载波 k 上的最优功率分配为:

$$p_{mk}^* = \max \left\{ 0, \frac{\lambda_m B_0 T_{\text{tx}}}{(w_m + \theta_m) \ln 2} - \frac{\sigma^2}{h_{mk}} \right\} \quad (34)$$

将 p_{mk}^* 代入式(31), 可得到 H_{mk} , 并根据式(32)得到子载波分配的最优解 ρ_{mk}^* . 然后采用次梯度法, 对式(34)的拉格朗日因子 θ 和 λ 进行迭代, 直至收敛, 得到最优的功率和子载波分配.

基于任务迁移子问题式(26)和无线资源分配子问题式(27)的求解过程, LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法归纳为算法 1.

定理 3 描述了算法 1 的收敛性.

定理 3 算法 1 每次迭代均可降低目标函数

算法 1 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法

1. 初始化子载波分配变量为 $\rho^{(0)}$, 并记迭代次数为 $l=0$;
2. WHILE $|E(\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))}, s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)}) - E(\rho^{(l)}, p^{(2l)}, s^{(l)}, T_{\text{tx}}^{(l)})| > \delta$
3. 对于确定的子载波分配变量 $\rho^{(l)}$, 求解凸优化子问题(26), 将其最优解记为 $(s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)})$, 并根据式(15)更新功率分配为 $p^{(2(l+1))}$;
4. 计算 $S_m^{(l+1)} = \sum_{k=1}^K s_{mk}^{(l+1)}$, $\forall m$. 对于确定的 $S_m^{(l+1)}$, $\forall m$ 和 $T_{\text{tx}}^{(l+1)}$, 采用拉格朗日对偶分解方法, 求解子问题式(27), 并得到子载波和功率分配结果 $(\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))})$;
5. $l \leftarrow l+1$;
6. END WHILE
7. 将优化问题式(25)的解记为 $(\rho^*, p^*, s^*, T_{\text{tx}}^*) = (\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))}, s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)})$;
8. 根据式(19)和式(22), 分别得到 D 和 f 的最优解, 记为 D^* 和 f^* ;
9. 输出: 原始优化问题(14)的解, 即 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配结果 $(f^*, \rho^*, p^*, s^*, D^*, T_{\text{tx}}^*)$.

$E(\rho, p, s, T_{\text{tx}})$ 的值, 并在有限次迭代内收敛.

证明 记 $E(\rho^{(l)}, p^{(2l)}, s^{(l)}, T_{\text{tx}}^{(l)})$ 为优化问题式(25)的第 l 次迭代的解, 则:

$$\begin{aligned} & E(\rho^{(l)}, p^{(2l)}, s^{(l)}, T_{\text{tx}}^{(l)}) \\ & \stackrel{(a)}{\geq} E(\rho^{(l)}, p^{(2l+1)}, s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)}) \\ & \stackrel{(b)}{\geq} E(\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))}, s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)}) \\ & = E(\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))}, s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)}) \end{aligned} \quad (35)$$

当固定子载波分配变量 $\rho^{(l)}$ 时, 算法 1 求子问题(26)的最优解 $(s^{(l+1)}, T_{\text{tx}}^{(l+1)})$, 并更新功率分配为 $p^{(2(l+1))}$, 所以式(35)中的不等式(a)成立. 同样地, 当固定各用户迁移的数据量 $S_m^{(l+1)}$, $\forall m$ 和传输时间 $T_{\text{tx}}^{(l+1)}$ 时, 算法 1 可得到子问题式(27)的解 $(\rho^{(l+1)}, p^{(2(l+1))})$, 所以式(35)中的不等式(b)成立. 不等式(35)表明, 算法 1 的每次迭代均可降低目标函数 $E(\rho, p, s, T_{\text{tx}})$ 的值. 由于目标函数值是有下界的, 故算法 1 将在有限次迭代内收敛. 证毕.

算法 1 迭代求解子问题式(26)和(27)直至收敛. 由于子问题式(26)为凸优化问题, 得到其最优解的复杂度为多项式复杂度. 子问题式(27)采用拉格朗日对偶方法求解, 其复杂度也为多项式复杂度. 根据定理 3, 算法 1 将在有限次迭代内收敛, 因此算法 1 具有多项式复杂度.

4 仿真结果与分析

本节对 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法(算法 1)的性能进行仿真与分析. 设置 LEO 卫星的飞行高度为 1500 km, 无线信道衰落包括自由空间路径损耗和莱斯衰落, 卫星天线增益为 43.3 dBi. 系统总带宽为 20 MHz, 子载波数量 $K=128$, 用户数量 $M=16$, 卫星 MEC 服务器的 CPU 时钟频率为 8 GHz, 且 $\kappa=10^{-26}$, $\beta=120$ cycle/bit.

图 1 示出了本文提出的 LEO 卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法的收敛性. 在每次迭代之后, 用户总能耗均降低, 并在数次迭代后收敛. 对于不同的任务可容忍时延 T , 算法的收敛速度略有差别, 但均可在约 8 次迭代内收敛. 因此, 本文所提出的任务迁移和资源分配算法的收敛速度较快.

图 2 示出了地面用户总能耗与计算任务数据量 η_m 之间的关系, 随着计算任务数据量的增加, 本文所提出的任务迁移和资源分配算法(算法 1)、本地计算以及任务数据全部上传算法的用户总能耗都在增加. 由于算法 1 采用了部分任务迁移机制, 可根据无线信道质量和计算任务数据量等因素优化迁移至卫星的数据量, 所以其能耗始终低于其它两种算法. 当计算任务的数据量

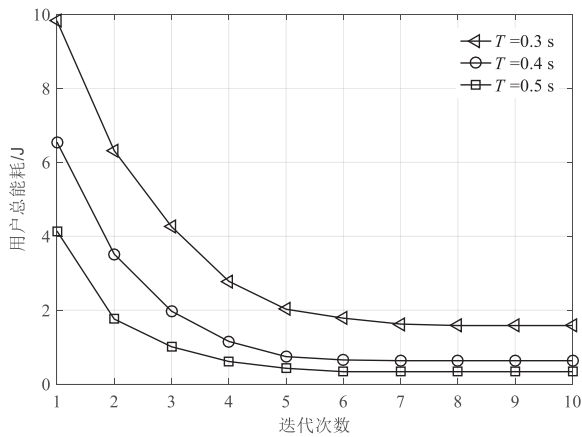


图1 LEO卫星协作边缘计算任务迁移和资源分配算法的收敛性

为 3 Mbit 时, 算法 1 的能耗比本地计算的能耗降低约 81%。对于任务数据全部上传算法, 当计算任务的数据量较少时, 其能耗低于本地计算的能耗。当计算任务的数据量较大时, 因为全部数据均必须在有限的带宽和时间内上传至 LEO 卫星 MEC 服务器, 所以任务数据全部上传算法的能耗将随着任务数据量的增加而快速增长。当计算任务的数据量超过 1.5 Mbit 时, 任务数据全部上传算法的能耗将远大于本地计算和算法 1 的能耗。

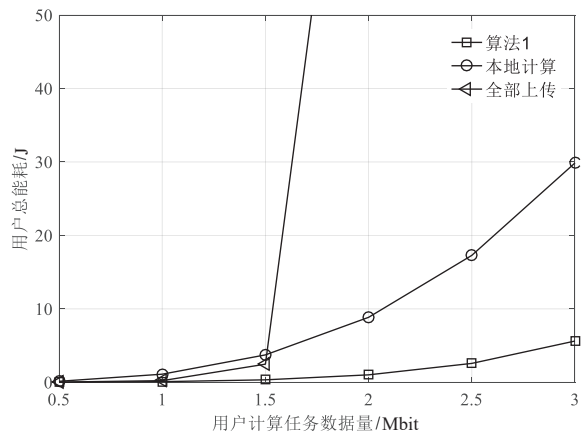


图2 用户总能耗与计算任务数据量之间的关系

图 3 示出了地面用户总能耗与计算任务可容忍时延 T 之间的关系。当计算任务的可容忍时延较小时, 用户需要在较短时间内完成任务数据的迁移和计算, 因此三种算法的总能耗均较高。随着任务可容忍时延的增加, 用户可在较长的时间内以较低的发射功率进行任务数据的迁移, 且本地计算的时间也较长, 因此总能耗逐渐降低。此外, 算法 1 的能耗始终低于本地计算和任务数据全部上传算法的能耗。当计算任务可容忍时延为 0.2 s 时, 算法 1 的能耗比本地计算的能耗降低约 74%。

图 4 示出了用户总能耗与 ISL 信道容量之间的关系。可以看出, ISL 的信道容量越大, 用户总能耗越低。对于相同的 ISL 信道容量, 卫星 MEC 服务器的 CPU 时钟

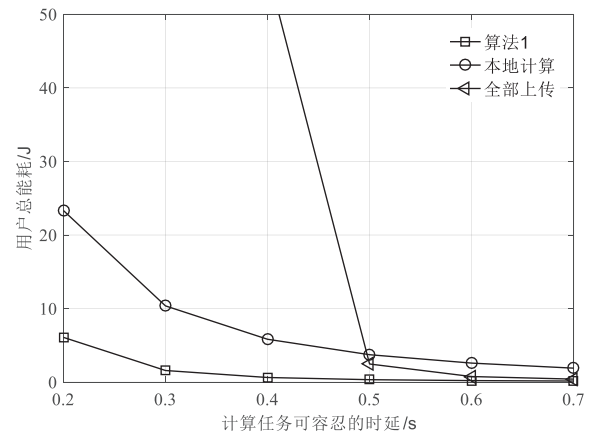


图3 用户总能耗与计算任务可容忍的时延之间的关系

频率 f_n^{EC} 越高, 用户总能耗越低。这是由于当 ISL 的信道容量较大时, 卫星间任务数据迁移产生的传输时延较小, 并且卫星 MEC 服务器的 CPU 时钟频率越高, 卫星执行边缘计算所需的时间越短, 因此用户向卫星迁移任务数据的时间 T_{tx} 较长。由定理 1 可知, 用户总能耗是关于 T_{tx} 的单调递减函数, 故用户总能耗将随着 ISL 信道容量和卫星 MEC 服务器的 CPU 时钟频率的增加而降低。当 ISL 的信道容量为 0 时, 表示 LEO 卫星间无法进行边缘计算协作, 此时用户的总能耗最高。与非协作卫星边缘计算相比, 当 ISL 的信道容量为 100 Mbit/s 时, 基于 ISL 的 LEO 卫星协作边缘计算的能耗可至少降低约 22%。

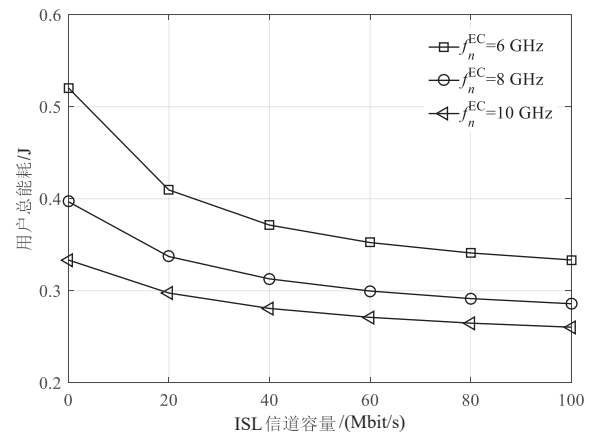


图4 用户总能耗与 ISL 信道容量之间的关系

5 结论

研究了 LEO 卫星协作边缘计算的任务迁移和资源分配算法, 以地面用户加权总能耗最小化为目标, 以计算任务可容忍时延等为约束条件, 通过 LEO 卫星 ISL 进行任务数据的二次迁移, 实现卫星间边缘计算的协作。由于所建立的优化问题的非凸性, 将其分解为两个子问题分别求解, 并提出了 LEO 卫星协作边缘计算的任务迁移和资源分配算法。仿真结果表明, 该算法可在 8

次迭代内收敛. 与本地计算和任务数据全部上传算法相比, 本文所提出的算法可至少降低约 74% 的用户总能耗; 与非协作卫星边缘计算相比, 基于 ISL 的 LEO 卫星协作边缘计算可至少降低约 22% 的用户总能耗, 且 ISL 的信道容量越大, 用户总能耗越低.

参考文献

- [1] WANG P, YAO C, ZHENG Z, SUN G, SONG L. Joint task assignment, transmission, and computing resource allocation in multilayer mobile edge computing systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2872-2884.
- [2] DING D, GAO Z, CHENG N. Feasibility of LTE-based GEO satellite mobile communication systems to support VoIP for handheld terminals[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(4): 829-834.
- [3] 韦亮, 宋高俊, 田亮. 基于部分信道信息的卫星移动链路 ACM 方法[J]. 电子学报, 2018, 46(9): 2063-2067.
- WEI L, SONG G, TIAN L. An ACM method based on partial channel information for mobile satellite link[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2063-2067. (in Chinese)
- [4] 周平, 殷波, 邱雪松, 郭少勇, 孟洛明. 面向服务可靠性的云资源调度方法[J]. 电子学报, 2019, 47(5): 1037-1043.
- ZHOU P, YIN B, QIU X, GUO S, MENG L. Service reliability oriented cloud resource scheduling method[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 1037-1043. (in Chinese)
- [5] YOU C, HUANG K, CHAE H, KIM B-H. Energy-efficient resource allocation for mobile-edge computation offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1397-1411.
- [6] MAO Y, ZHANG J, SONG S H, LETAIEF K B. Stochastic joint radio and computational resource management for multi-user mobile-edge computing systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 5994-6009.
- [7] ZHANG J, HU X, NING Z, NGAI E C-H, ZHOU L, WEI J, CHENG J, HU B. Energy-latency tradeoff for energy-aware offloading in mobile edge computing networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 2633-2645.
- [8] GUO F, ZHANG H, JI H, LI X, LEUNG V C M. An efficient computation offloading management scheme in the densely deployed small cell networks with mobile edge computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(6): 2651-2664.
- [9] DAI Y, XU D, MAHARJAN S, ZHANG Y. Joint computation offloading and user association in multi-task mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12313-12325.
- [10] ZHANG Z, ZHANG W, F-H TSENG. Satellite mobile edge computing: Improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.
- [11] XIE R, TANG Q, WANG Q, LIU X, YU F R, HUANG T. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [12] CHENG N, LYU F, QUAN W, ZHOU C, HE H, SHI W, SHEN X. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(5): 1117-1129.
- [13] 王星宇, 李勇军, 赵尚弘, 曹桂兴, 谭庆贵, 郑永兴, 姜勇. 基于 IEEE 802.11 的星间链路最短接入时延退避算法[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2936-2941.
- WANG X, LI Y, ZHAO S, CAO G, TAN Q, ZHENG Y, JIANG Y. A delay-optimal backoff algorithm for IEEE 802.11 over inter-satellite links[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2936-2941. (in Chinese)

作者简介



宋政育 男, 1984 年生于山东威海. 现为北京交通大学电子信息工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为空地一体化通信, 移动边缘计算, 智能超表面通信, 物联网以及专业移动通信等.

E-mail: songzy@bjtu.edu.cn



郝媛媛 (通讯作者) 女, 1995 年生于河北廊坊. 现为中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部工程师. 主要研究方向为与 5G/6G 融合的卫星互连网络通信系统, 无人机通信, 物联网以及移动边缘计算等.

E-mail: tracyhao@bit.edu.cn



孙昕 女, 1967 年生于吉林通化. 现为北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为专业移动通信系统, 卫星通信以及物联网等.

E-mail: xsun@bjtu.edu.cn