

基于 NOMA 的移动边缘计算网络优化方案*

冯韶华, 陈青华, 欧阳中辉, 李 钊

(海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 移动边缘计算(MEC)使智能终端能够将部分计算负载转移到位于基站子系统的边缘服务器上,以解决物联网网络大量数据处理问题。通过研究非正交多址(NOMA)的多址 MEC,提出了一种终端-边缘服务器资源分配方案,通过 NOMA 方式传输,智能终端可以将计算工作负载卸载到不同的边缘服务器,从而减少完成智能终端的计算工作负载的总延迟。该方案目标是优化资源成本最小,该系统成本考虑终端卸载的计算工作量和边缘服务器的计算资源使用成本的总延迟。通过单个终端的最优卸载解决方案数值结果验证了方案的有效性。

关键词: 移动边缘计算;非正交多址;资源成本最小化;资源分配;最优卸载

中图分类号: TN92;TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211682

中文引用格式: 冯韶华, 陈青华, 欧阳中辉, 等. 基于 NOMA 的移动边缘计算网络优化方案[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 62-66, 70.

英文引用格式: Feng Shaohua, Chen Qinghua, Ouyang Zhonghui, et al. NOMA enable network optimization scheme of mobile edge computing[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 62-66, 70.

NOMA enable network optimization scheme of mobile edge computing

Feng Shaohua, Chen Qinghua, Ouyang Zhonghui, Li Zhao

(College of Coastal Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Mobile edge computing(MEC) enables an intelligent terminal to transfer part of the computing load to the edge server located in the base station subsystem to solve the problem of mass data processing in IoT network. In this paper, a resource allocation scheme of terminal to edge server is proposed by studying NOMA multi-access MEC. By NOMA transmission, the intelligent terminal can offload the computing workload to different edge servers, so as to reduce the total delay of completing the computing workload of the intelligent terminal. The goal of this scheme is to minimize the cost of the system, which takes into account the total delay of the computing workload unloaded by the terminal and the cost of using the computing resources of the edge server. The numerical results of the optimal unloading solution with a single terminal are used to verify the effectiveness of the proposed solution.

Key words: moving edge calculation(MEC); non-orthogonal multiple access(NOMA); system cost minimization; resource allocation; optimal discharge

0 引言

随着现代信息社会的快速发展,计算密集型移动应用日益遍及,使得广域物联网以及各种耗费资源的应用(例如虚拟现实、自动驾驶)实现爆炸性增长^[1-2]。但是,传统的智能终端通常配备有有限的计算资源,无法负担巨大的业务流量,同时计算时延等问题会导致在运行需要大量资源的服务时,服务质量下降,无法满足需求。移动边缘计算(MEC)能使智能终端能够主动地将部分计算工作负载卸载到位于基站子系统的边缘服务器中,为解决这一具有挑战性的问题提供了一种有效的方法^[3-6]。

通过向附近的边缘服务器卸载负载,MEC 可以有效

减少计算延迟和节省移动终端能耗等问题。因此,许多工作人员都致力于研究 MEC 在不同应用中的开发^[7-10]。由于物联网中无线链路数据传输使动态资源调度具有随机性和复杂性,MEC 的性能取决于数据传输的无线资源分配和智能终端的计算卸载,因此卸载决策和计算缓存的制定至关重要。为进一步提高通过 MEC 进行计算卸载的效率,解决计算卸载和缓存的能耗,需要一种新的多址 MEC 技术以满足需求,使终端可以利用不同的无线网络将计算工作量同时卸载到多个边缘服务器上。

非正交多址(NOMA)技术在提高网络频谱效率方面显示出了巨大的潜力。MT-2020(5G)推进组《5G 愿景与需求白皮书》中提出,5G 定位于频谱效率更高、速率更

* 基金项目:军队科研基金(41721407)

快、容量更大的无线网络。4G 采用了正交多址接入技术,而 5G 频谱效率相比 4G 需要提升 5~15 倍,为了进一步提升频谱效率,发明了非正交多址(NOMA)技术^[11-13]。NOMA 在发送端采用非正交发送,引入干扰信息,接收端通过串行干扰删除(SIC)抵消干扰,实现正确解调,NOMA 可以有效地提高无线接入网络(RAN)中的资源利用效率。

本文以边缘计算发展为背景,提出了一种物联网系统中支持 NOMA 的多址接入边缘服务器的方案,将终端利用 NOMA 卸载的计算工作负载同时分配到不同的服务器上。该方案要构建支持多址的 MEC,就需要考虑联合设计算法,包含智能终端的无线资源分配,通过 NOMA 发送卸载的工作负载,以及在不同的边缘服务器上分配计算资源,执行智能终端卸载的工作负载。

1 基于 NOMA 的终端-边缘服务器模型建立

1.1 边缘计算模型分析

传统物联网网络中,一个云服务器需要对应多个用户上传数据、分配任务和解决需求,本文以此为基础建立基于 NOMA 的边缘计算服务器下任务卸载和分配模型^[14],如图 1 所示。

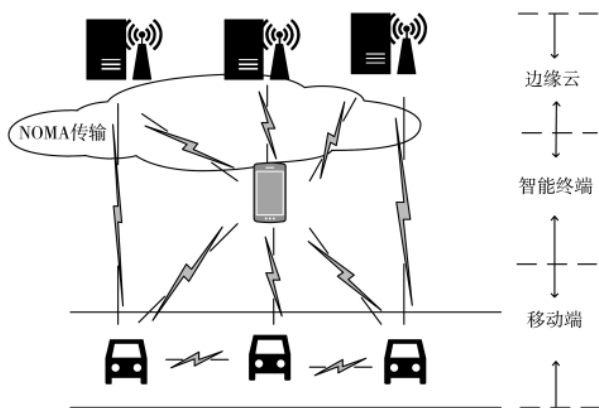


图 1 边缘计算原理图

当一个终端执行计算密集型任务时(例如自动驾驶中具有环境感知功能的智能仿生摄像头,其需要收集分析目标车辆、实际路况等一系列环境因素及时决策和作出反应),终端的物联网数据数据传输之间存在延迟。为了减少计算延迟,终端使用 NOMA 通过多址 MEC 将其计算负载卸载到边缘服务器上,设有 N 组边缘服务器, $N=\{1, 2, \dots, n\}$, L_n 表示从终端到边缘服务器的信道功耗,设为:

$$L_1 > L_2 > \dots > L_n \quad (1)$$

设 W_n 表示终端向边缘服务器的发射功率,根据香农定理,从终端到边缘服务器 n 的信息速率 R_n 表示为:

$$R_n = W \log_2 \left(1 + \frac{L_n W_n}{L_n \sum_{i=1}^{n-1} W_i + W_{n_0}} \right), \forall n \in N \quad (2)$$

其中, W 表示信道带宽, n_0 表示高斯噪声的频谱功率密

度, W_{n_0} 表示高斯噪声功率。设 SNR 表示边缘服务器处的接收信噪比,即:

$$\text{SNR} = \frac{L_n W_n}{L_n \sum_{i=1}^{n-1} W_i + W_{n_0}}, \forall n \in N \quad (3)$$

若信道功耗 L_n 和发射功率 W_n 已知,则 SNR 已知。设不同大小 SNR 的边缘服务器集合为 $\{A_n\}_{n \in N}$,由文献[15]得终端到达 $\{A_n\}_{n \in N}$ 时的最小总发射功率为:

$$P(\{A_n\}_{n \in N}) = W_{n_0} \sum_{n \in N} \left(\frac{1}{L_n} - \frac{1}{L_{n-1}} \right) \prod_{i=n}^N (1 + A_i) - \frac{W_{n_0}}{L_N} \quad (4)$$

式中,当 $n=0$ 时, $\frac{1}{L_0}=0$ 。

终端要发送的计算工作量设为 s ,为了减少完成 s 的总体延迟,终端可以将其部分计算工作卸给 I 中的边缘服务器工作。设 $s_n \in [0, S]$ 表示终端向不同边缘服务器卸载的计算工作负载,用 t 表示终端同时发送 $\{s_n\}_{n \in N}$ 到不同边缘服务器的 NOMA 传输持续时间,为方便控制变量,假设卸载工作负载到不同边缘服务器所用的传输时间是相同的。

若已知 NOMA 传输时间 t 和终端向不同的边缘服务器卸载的工作负载 $\{s_n\}_{n \in N}$,即可得终端到边缘服务器的信息速率为 $R_n = \frac{s_n}{t}$,根据式(2)和式(3),可得:

$$\text{SNR} = 2^{\frac{s_n}{t \cdot W}} - 1 \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到式(6),则终端向边缘服务器卸载的最小传输功率为:

$$P(t, \{s_n\}_{n \in N}) = W_{n_0} \sum_{n \in N} \left(\frac{1}{L_n} - \frac{1}{L_{n-1}} \right) 2^{\frac{1}{W} \sum_{n=1}^N \frac{s_n}{t}} - \frac{W_{n_0}}{L_N} \quad (6)$$

为确保终端能将用于将卸载的计算工作负载 $\{s_n\}_{n \in N}$ 发送到各个边缘服务器,终端总发射功率不能大于其最大发射功率。设 P_{\max} 表示终端的最大发射功率,有以下约束条件:

$$P(t, \{s_n\}_{n \in N}) \leq P_{\max} \quad (7)$$

除了对最大发射功率的限制外,终端还具有能耗资源预算 E_{\max} 限制。为确保终端传输数据和本地计算的总能耗不超过 E_{\max} ,有以下约束条件:

$$tP(t, \{s_n\}_{n \in N}) + \frac{S - \sum_{n \in N} s_n}{\alpha} \beta \leq E_{\max} \quad (8)$$

式中,参数 α 表示终端的局部计算速率,参数 β 表示终端的局部计算的功耗, $\frac{S - \sum_{n \in N} s_n}{\alpha}$ 表示终端的局部计算延迟。

因为 α 是终端的内部资源,可将其局部计算速率 α 视为一个固定常数,相应地,用于局部计算的功耗 β 也被视为常数。

通过将 $\{s_n\}_{n \in N}$ 卸载到边缘服务器,可以表示终端

完成其 S 的总延迟如下:

$$\Delta t = \max \left\{ t + \max_{n \in N} \left\{ \frac{s_n}{\alpha_n} \right\}, \frac{S - \sum_{n \in N} s_n}{\alpha} \right\} \quad (9)$$

式中, α_n 表示边缘服务器提供的计算速率, $t + \frac{s_n}{\alpha_n}$ 表示终端将其计算工作负载卸载到边缘服务器的延迟。在卸载的同时, 终端还处理剩余的工作负载, 该工作负载消耗

的延迟等于 $\frac{S - \sum_{n \in N} s_n}{\alpha}$ 。在下面的问题公式中, 将 $\{\alpha_n\}_{n \in N}$ 作为控制变量。

1.2 NOMA 建模优化

假设每个边缘服务器都有足够的计算资源和能量来执行卸载的工作负载。终端需要为每个边缘计算服务器承担计算资源。设 C_n 表示边缘服务器使用计算资源的边际成本, 则在边缘服务器处使用计算资源的终端总

成本为 $\sum_{n \in N} C_n \alpha_n$ 。

根据终端提供的总成本, 考虑终端在完成其所需工作负载时的总体延迟, 以及它因消耗计算资源而向边缘服务器提供的资源成本, 因此, 可得一种以资源为主的优化方案: 资源成本最小化(RCM), 此步骤优化方案设为基础模型 RCM-Basic。目标函数应该包括终端在使用多址移动边缘计算时的服务质量以及相应的外部计算资源消耗, 即:

$$F_{\text{Basic}} = \min \omega \Delta t + \sum_{n \in N} C_n \alpha_n \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{n \in N} s_n \leq S \\ \Delta t \leq T_{\max} \\ \sum_{n \in N} C_n \alpha_n \leq C_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, 参数 ω 表示终端在完成其总工作负载 S 时的总延迟的权重。通过改变参数 ω 大小, 可以控制边缘服务器与终端之间的时延与其计算资源消耗之间的不同权衡。

在 RCM-Basic 中, 由式(11)得从终端卸载的总工作负载不能超过 S , 终端卸载完 S 的总延迟不能超过最大容许延迟 T_{\max} , 终端在边缘服务器处使用计算资源的成本不能超过总成本预算 C_{\max} 。在优化方案里, 假定每个边缘服务器都有足够的计算资源和能量资源来适应终端的卸载计算负载, 因此, 在 RCM-Basic 中, 不考虑对边缘服务器的能量资源和计算资源的限制, 也不考虑 NOMA 用于 MEC 带来额外的系统复杂性(例如, 不同的边缘服务器的协作消息交换)。

2 方案优化算法研究

2.1 等价转换

此小节将重点讨论如何利用分层结构来解决 RCM

问题, 并根据一种有效的算法来确定最佳的卸载解决方案。通过式(9)中的定义, 得:

$$t + \max_{n \in N} \left\{ \frac{s_n}{\alpha_n} \right\} \leq \Delta t \Rightarrow s_n \leq \alpha_n (\Delta t - t), \forall n \in N \quad (12)$$

$$\frac{S - \sum_{n \in N} s_n}{\alpha} \leq \Delta t \Rightarrow S - \alpha \Delta t \leq \sum_{n \in N} s_n \quad (13)$$

根据式(12)和式(13), 可以将问题 RCM-Basic 问题转化为以下等价形式 RCM-Once:

$$F_{\text{Once}} = \min \frac{1}{\Delta t - t} \sum_{n \in N} C_n s_n + \omega \Delta t \quad (14)$$

$$\sum_{n \in N} C_n s_n \leq C_{\max} (\Delta t - t) \quad (15)$$

限制条件(15)源于通过式(12)之前的限制条件(11)。然而, RCM-Once 问题仍然很难直接解决。因此, 引入一个辅助变量 τ 表示终端系统成本的上边界, 如下所示:

$$\tau \geq \frac{1}{\Delta t - t} \sum_{n \in N} C_n s_n + \omega \Delta t \quad (16)$$

注意, 式(16)导致以下等效约束:

$$(\Delta t - t) \tau \geq \sum_{n \in N} C_n s_n + \omega \Delta t (\Delta t - t) \quad (17)$$

利用 τ , 可以进一步将 RCM-Once 问题转化为 RCM-Twice:

$$F_{\text{Twice}} = \min \tau \quad (18)$$

限制条件同式(15)和式(11)。

问题的转化如图 2 所示。

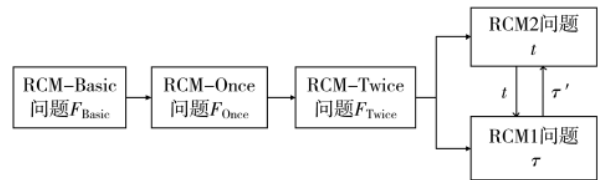


图 2 转化原理图

2.2 算法分层

解决 RCM-Twice 问题即是研究它的分层结构, 原理图如图 3 所示。

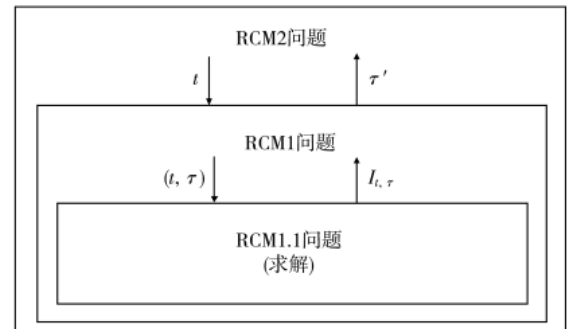


图 3 分层原理图

具体地,假设 NOMA 传输持续时间 $t \in \left[0, \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\}\right]$

是给定的(根据式(9), $t \leq \frac{S}{\alpha}$, 否则终端只在本地执行整个工作负载,而不卸载任何工作负载)。然后,问题 RCM-Twice 导致一个子问题 RCM1,如下所示:

$$\tau' = \min \tau \quad (19)$$

$$t < \Delta t \leq \left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\} \quad (20)$$

子问题 RCM1 的目标是求给定 t 条件下 τ (用 τ' 表示)的最小值。

利用子问题 RCM1 的 τ' 输出,可以通过解决以下顶层问题 RCM2 来进一步解决问题 RCM-Twice:

$$\tau^* = \min \tau \quad (21)$$

$$0 \leq t \leq \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\} \quad (22)$$

式(21)中,顶问题 RCM2 的最佳值用 τ^* 表示,其为原始问题 RCM 的最小资源成本。只要子问题 RCM1 和子问题 RCM2 都能求解,就能够最优地求解原问题。

(1)子问题求解

基于上述分解,首先针对给定 t 值下的问题 RCM1 进行求解。注意,对于给定的 NOMA 传输持续时间 t ,问题 RCM1 的目的是寻找 τ 的最小值(用 τ' 表示),使得由式(14)、式(15)、式(17)构造的可行域是非空的。

在给定 t 的情况下,根据式(16), τ 值的可行区间为 $[\omega t, \omega T_{\max} + C_{\max}]$ 。基于此原理,在给定的 (t, τ) 元组中, $t \in \left[0, \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\}\right]$ 和 $\tau \in [\omega t, \omega T_{\max} + C_{\max}]$,所以考虑以下优化问题 RCM-1.1:

$$I_{t,\tau} = \max_{n \in N} s_n - (S - \alpha \Delta t) \quad (23)$$

变量约束条件为式(14)、式(15)、式(17)。

注意,如果 $I_{t,\tau} \geq 0$,那么当前给定 τ 可以得到子问题 RCM1 是可行的,可以进一步降低 τ ;否则 $I_{t,\tau} < 0$,则当前给定的 τ 产生子问题 RCM1 变得不可行,需要增加 τ 。只要 $\frac{S}{\alpha} \beta \leq E_{\max}$,问题 RCM1.1 本身总是可行的,则意味着终端有足够的资源预算在本地完成其整个计算工作量。若求得 $I_{t,\tau}$ 的值,即可解决问题 RCM1.1。

根据凸优化理论^[16],因为给定 t 的约束条件式(7)和式(8)对于 $\{s_n\}_{n \in N}$ 是严格凸的,另外,在给定的 (t, τ) 元组下,约束条件(17)相对于 Δt 和 $\{s_n\}_{n \in N}$ 是凸的,所有其他约束条件都是线性的,所以,问题 RCM1.1 是一个凸优化问题。

综上所述,即可得到关于问题 RCM1.1 的重要结论:

给定 (t, τ) 的元组 $t \in \left[0, \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\}\right]$ 和 $\tau \in [\omega t, \omega T_{\max} + C_{\max}]$,问题 RCM1.1 是一个关于 Δt 和 $\{s_n\}_{n \in N}$ 的凸优化问题。

据此,本文用凸优化工具包 CVX^[16]来求解问题 RCM1.1,并在给定的 (t, τ) 元组下得到 $I_{t,\tau}$ 的对应值。特别是从式(16)可以得到以下重要性质:在给定的 t 值下,子问题 RCM1 的可行域不随 τ 的增大而减小。因此,问题 RCM1.1 的输出, $I_{t,\tau}$ 的值在 τ 中非递减。基于这一重要性质,可以采用二分法查找来求得 τ' ,使得子问题 RCM1 是可行的。

(2)顶问题求解

在求解 RCM1 问题并获得每个给定 t 的 τ' 值后,继续求解 RCM2 问题。

解决问题 RCM2 的关键难点在于不能解析地表示 τ' 。但是,问题 RCM2 是一个单变量优化问题,其中决策变量 t 在 $\left[0, \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\}\right]$ 的固定区间内。因此,可采用一种线性查找法^[14]来确定 t 的最优值 t^* ,以最小化 τ' 。通关计算每个 t 对应的 τ' 值,可得到输出的 (t^*, τ^*) ,即求解 RCM1.1 问题来获得 Δt^* 和 $\{s_n^*\}_{n \in N}$ 的值。然后,可以得出每个边缘服务器的最佳计算速率分配公式为 $\alpha_n^* =$

$\frac{s_n^*}{\Delta t^* - t^*}$ 。这样,就可得到 RCM 问题最佳解决方案。

3 数值结果

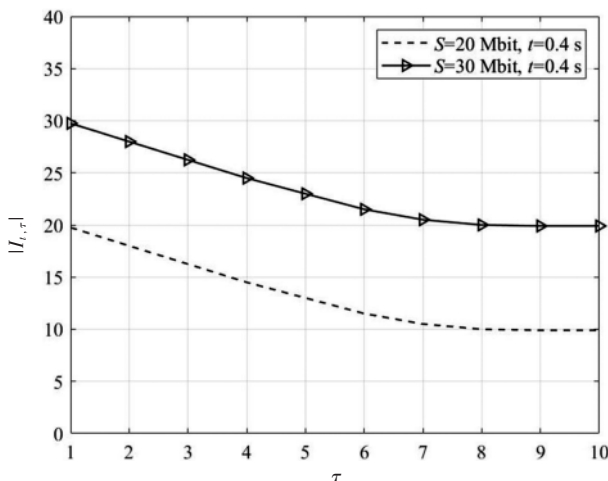
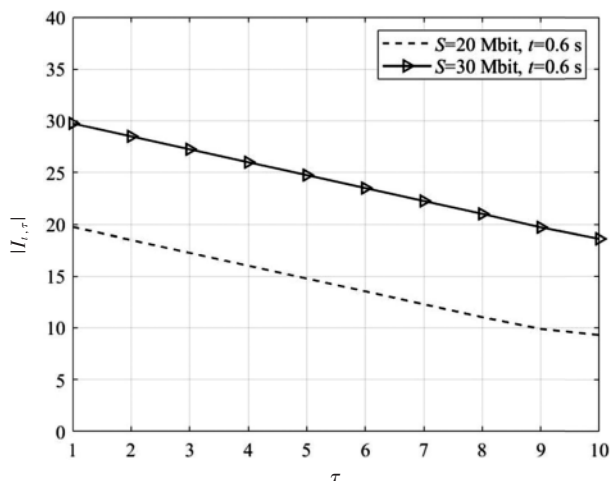
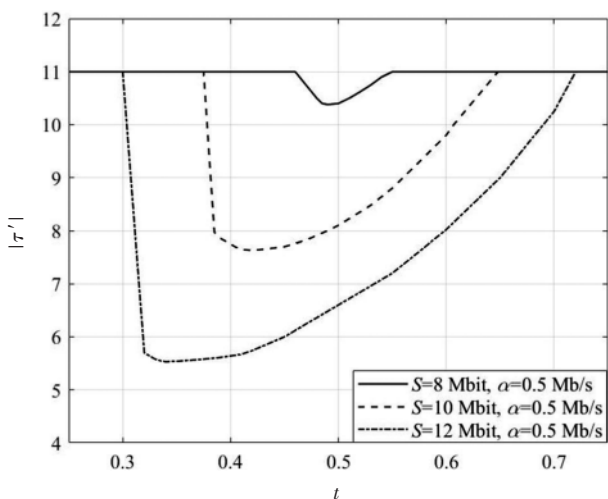
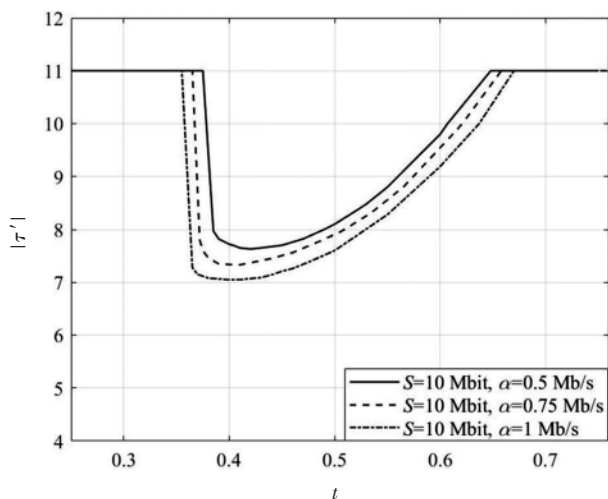
此小节将仿真解决 RCM 问题算法的有效性,以证明提出的 NOMA 的 MEC 方案的可行性。设置有 5 台边缘服务器,其中 5 个边缘服务器均匀地位于一个圆心为 $(0, 0)$ 、半径为 500 m 的圆上。同时,终端随机位于以 $(0, 0)$ 为中心、半径为 100 m 的圆形平面内,并根据距离模型生成从终端到边缘服务器的相应信道功率增益。根据上述设置,这里使用 $\{L_n\}_{n \in N} = \{0.289\ 7, 0.230\ 1, 0.171\ 6, 0.134\ 4, 0.119\ 2\} \times 10^{-6}$ 。基本参数设置 $T_{\max} = 1$ s, $P_{\max} = 5$ W, $E_{\max} = 5$ Joule, $C_{\max} = 10$ \$。另外,对于终端,设置其信道带宽 $W = 5$ MHz,所需计算工作量 $S = 10$ Mbit,本地计算速率 $\alpha = 0.5$ Mb/s,本地计算功耗 $\beta = 0.1$ W。对于边缘服务器组,设置其各自的计算资源 $\{C_n\}_{n \in N} = \{0.45, 0.43, 0.41, 0.39, 0.37\}$,权重 $\omega = 1$ 。

图 4 验证了解决 RCM1.1 问题的算法的基本原理,表明了该方案解决 RCM1 问题的可行性。

如图 4 所示,图横纵坐标分别为 τ 和 $|I_{t,\tau}|$,说明了对于每个给定的 t 值, $I_{t,\tau}$ (即第 2 节中问题 RCM1.1 求最佳值)在 τ 中均不减小的性质,这个重要的性质证明了该方案可以采用二分法查找来确定 τ' 的值,以使 $I_{t,\tau} = 0$ 。

图 5 进一步说明了求解顶层 RCM2 问题的算法的基本原理,即在区间 $\left[0, \min\left\{T_{\max}, \frac{S}{\alpha}\right\}\right]$ 上以较小的步长执行线性搜索,以证明该方案可行性。

如图 5 所示,函数曲线的最低点对应坐标可得 (t^*, τ^*) ,可以合理地观察到 NOMA 传输持续时间 t 太小或太大都无益于使总的资源成本最小化。一方面,当 t 较小时,

(a) $t=0.4$ s 时(b) $t=0.6$ s 时图4 $|I_{t,\tau}|$ 的结果图(a) 不同 S 下 $|\tau'|$ 与 t (b) 不同 α 下 $|\tau'|$ 与 t 图5 不同 S 或 α 下 $|\tau'|$ 与 t 关系图

终端需要使用较大的发射功率将卸载的工作负载发送到边缘服务器,结果终端的计算需求中只有一小部分可以卸载,因此当 t 较小时,资源成本 τ^* 较大;另一方面,使用大的 t 会导致 NOMA 传输的显著延迟,影响资源卸载、计算。图5表明需要谨慎选择 t 来最小化总资源成本。

4 结论

本文研究了物联网系统中支持 NOMA 的多址 MEC,通过解决资源成本最小化问题,考虑终端完成所需计算工作量的总延迟和边缘服务器的总计算资源消耗成本,提出了一种搭建智能终端-边缘服务器平台的方案,对边缘服务器处的计算资源分配和终端的卸载工作负载进行了优化。MATLAB 仿真实验结果验证,提出的优化算法可以通过分层算法来寻找最优解,首先对于子问题,证明其具有非凸性,可用凸优化工具包 CVX 来求解;其次对于顶问题,证明其单变量特点,可采用一种线性查找法来确定最优值,综上展示了该方案对支持 NOMA 的

多址 MEC 的可行性。

MEC 平台的建立需要多方面考虑,后续将针对平台内的资源分配和任务卸载进行算法优化。

参考文献

- [1] 魏立明,吕雪莹.物联网技术研究综述[J].数码世界,2016(8):36-37.
- [2] 宋世达.物联网关键技术与应用[J].电子技术与软件工程,2017,120(22):14.
- [3] 李子姝,谢人超,孙礼,等.移动边缘计算综述[J].电信科学,2018,34(1):87-101.
- [4] NI J, LIN X, SHEN X. Towards edge-assisted Internet of Things: from security and efficiency perspectives[J]. IEEE Network, 2019, 33(2): 50-57.
- [5] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.

(下转第 70 页)

值成分。

参考文献

- [1] MIAO F, ZHAO R, JIA L, et al. Multisource fault signal separation of rotating machinery based on wavelet packet and fast independent component analysis[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2021(5): 1-17.
- [2] FENG P, LI L. On extending the noisy independent component analysis to impulsive components[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 88(3): 415-427.
- [3] YAO J, XIANG Y, QIAN S, et al. Noise source identification of diesel engine based on variational mode decomposition and robust independent component analysis[J]. Applied Acoustics, 2017, 116: 184-194.
- [4] TIAN X, CAI L, CHEN S. Noise-resistant joint diagonalization independent component analysis based process fault detection[J]. Neurocomputing, 2015, 149(PB): 652-666.
- [5] KAWAKAMI H, SAMATSU T, SONODA Y. Application of independent component analysis to improvement of signal-to-noise ratio in optical wave microphone[J]. ICIC Express Letters, Part B: Applications, An International Journal of

Research & Surveys, 2016, 7(2): 469-474.

- [6] YOSHIDA Y, NAKAGAWA D, KARASHIMA A, et al. Reduction of light source noise from optical intrinsic signals of mouse neocortex by using independent component analysis[C]// Conf. Proc. IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2015: 5587-5591.
- [7] MOULINES E, CARDOSO J, GASSIAT E. Maximum likelihood for blind separation and deconvolution of noisy signals using mixtures models[C]// Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1997: 3617-3620.
- [8] CARDOSO J F, SOULOUMIAC A. Blind beamforming for non-Gaussian signals[J]. Proc. Inst. Elect. Eng. — Radar Signal Process, 1993, 140(6): 362-370.
- [9] ANEMULLER J. Complex spectral-domain independent component analysis of electroencephalographic data[C]// Proc. of 4th International Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation(ICA2003), Nara, Japan, 2003.
- [10] BINGHAM E, HYVÄRINEN A. A fast fixed-point algorithm

(下转第 75 页)

(上接第 66 页)

- [6] SAMANTA A, CHANG Z. Adaptive service offloading for revenue maximization in mobile edge computing with delay-constraint[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 3864-3872.
- [7] AL-SHUWAILI A, SIMEONE O. Optimal resource allocation for mobile edge computing-based augmented reality applications[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2016, 6(3): 398-401.
- [8] WANG Y, SHENG M, WANG X, et al. Mobile-edge computing: partial computation offloading using dynamic voltage scaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(10): 4268-4282.
- [9] ZHANG J, GUO H, LIU J, et al. Task offloading in vehicular edge computing networks: a load-balancing solution[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 2092-2104.
- [10] PU L, CHEN X, MAO G, et al. Chimera: an energy-efficient and deadline-aware hybrid edge computing framework for vehicular crowdsensing applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 84-99.
- [11] 王正强, 成蓁, 樊自甫, 等. 非正交多址系统资源分配研究综述[J]. 电信科学, 2018(8): 136-146.

- [12] 高东, 梁子林. 基于能量效率的双层非正交多址系统资源优化算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(5): 192-198.
- [13] PAN Y, CHEN M, YANG Z, et al. Energy-efficient NOMA-based mobile edge computing offloading[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 310-313.
- [14] QIAN L P, SHI B, WU Y, et al. NOMA-enabled mobile edge computing for Internet of Things via joint communication and computation resource allocations[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 718-733.
- [15] WU Y, QIAN L P, MAO H, et al. Optimal power allocation and scheduling for non-orthogonal multiple access relay-assisted networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(11): 2591-2606.
- [16] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.

(收稿日期: 2021-04-22)

作者简介:

冯韶华(1997-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机网络及应用, E-mail: 1046314213@qq.com。

陈青华(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 装备信息化。

欧阳中辉(1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 兵器科学与技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所