

# 移动边缘计算中具有能耗优化的任务迁移策略



胡锦涛 王高才 徐晓桐

广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004

(hujtice@163.com)

**摘要** 随着通信技术的进步,资源受限的移动终端设备已不能满足移动用户在数据处理方面急剧增加的需求。一方面,移动边缘计算可将移动设备上的任务迁移到边缘计算服务器进行处理,从而在一定程度上解决移动设备计算能力不足的问题;另一方面,在任务迁移过程中,如何保持较高的服务性能,同时降低移动终端的能耗,是研究者和移动用户所关心的主题。文中着力于研究以迁移时间收益为约束的数据迁移平均能耗最小化的问题。首先,利用迁移时间收益公式获得移动终端周期性侦测到的边缘计算服务器的迁移速率阈值;然后,构建具有时间收益约束的数据迁移平均能耗最小化的最优停止问题,证明其存在最优停止规则,并求出最优的数据迁移平均能耗;最后,移动终端综合考虑获取的迁移速率阈值以及最优数据迁移平均能耗来选择用于任务迁移的边缘计算服务器,从而实现具有能耗优化的任务迁移策略。在仿真实验中,以平均迁移数据总量、平均迁移时间以及平均数据迁移能耗等性能参数为指标,将所提优化策略与其他迁移策略进行对比。实验结果表明,相对于另外两种对比策略,具有能耗优化的任务迁移策略拥有较短的迁移时间以及较小的平均数据迁移能耗;此外,在有效数据迁移率参数指标上,所提策略也能够达到大约10%~40%的性能提升,获得了较好的迁移性能提升效果。

**关键词:** 移动边缘计算;任务迁移;信道质量;迁移速率;最优停止;能耗优化;有效迁移率

**中图法分类号** TP393

## Task Migration Strategy with Energy Optimization in Mobile Edge Computing

HU Jin-tian, WANG Gao-cai and XU Xiao-tong

School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China

**Abstract** With the advancement of communication technology, resource-constrained mobile terminal devices have been unable to meet the rapidly increasing demand for data processing by mobile users. On the one hand, mobile edge computing can be processed by migrating tasks on the mobile device to the edge computing server, which can solve the problem of insufficient computing power of the mobile device to some extent. On the other hand, how to maintain high service performance during task migration as well as reducing the energy consumption of mobile terminals is also a topic of concern for researchers and mobile users. This paper focuses on the study of the problem of minimizing the average energy consumption of data migration based on the migration time benefit. Firstly, migration rate threshold of edge computing server detected periodically by mobile terminal is obtained by migration time revenue formula. Secondly, the optimal stopping problem of minimizing the average energy consumption of data migration with time-return constraint is constructed. It is proved that there is an optimal stopping rule and the optimal average energy consumption of data migration is obtained. Finally, the mobile terminal selects the edge computing server for task migration together with the obtained migration rate threshold and the optimal data migration average energy consumption, thereby implementing a task migration strategy with energy optimization. In the simulation experiment, the optimization strategy and other migration strategies proposed in the paper are compared on the performance parameters such as the average migration data, the average migration time, and the average data migration energy consumption. The experimental results show that compared with the other two comparison strategies, the task migration strategy with energy optimization has shorter migration time and smaller average data migration energy consumption. In addition, the performance of the effective data mobility parameter can also achieve about 10% to 40% performance improvement, and obtain better migration performance improvement effect.

**Keywords** Mobile edge computing, Task migration, Channel quality, Migration rate, Optimal stopping, Energy consumption optimization, Effective mobility

到稿日期:2019-04-11 返修日期:2019-08-13 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61562006);广西自然科学基金(2016GXNSFBA380181)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61562006) and Natural Science Foundation of Guangxi, China (2016GXNSFBA380181).

通信作者:王高才(wanggcgx@163.com)

## 1 引言

随着移动通信技术的进步,移动网络的应用场景越来越多样化,例如移动视频直播、智慧医疗、智能交通以及移动支付等<sup>[1]</sup>,这些应用通常会消耗大量的资源(计算和存储)。资源受限的移动终端设备的计算能力已不能满足移动用户在数据处理方面急剧增加的需求。面对日益增长的服务需求,仅靠扩展移动设备的硬件系统来提高终端的性能很难改变现状。因此,寻找能够解决终端计算能力不足的新技术已迫在眉睫。

因此,研究人员将边缘计算与移动网络相结合,提出一种新的网络功能范式,即移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)<sup>[2]</sup>。移动边缘计算就是将原来云数据中心的资源分散到移动终端设备的附近,通过构建 MEC 平台对计算资源、存储资源进行统一的管理<sup>[3]</sup>,移动终端设备则将计算、存储等功能迁移到 MEC 平台来解决自身计算能力不足的问题。针对日益复杂的迁移环境,多 MEC 平台覆盖的服务场景是有效的应对模式<sup>[4]</sup>。近年来,研究者们对移动边缘计算的任务迁移能耗问题进行了深入的研究:文献[5-7]研究了任务调度的能耗优化问题;文献[8-12]对任务迁移的能耗、时延等指标进行多目标优化,解决了移动终端能耗过大或迁移时延过长的问題。然而,这些迁移优化策略都是在单一 MEC 平台网络环境下进行的,尚未考虑多 MEC 平台的任务迁移场景。

本文着力于研究以迁移时间收益为约束的数据迁移平均能耗最小化的问题,通过寻找出合理的任务迁移策略,尽可能地降低移动终端的能量消耗,同时一定程度地提升任务迁移的性能。基于多 MEC 平台服务场景,文中提出一种具有能耗优化的任务迁移策略。与以往迁移优化策略不同,该策略将移动终端与 MEC 平台之间无线链路的信道质量与任务迁移研究相结合,依据数据迁移平均能耗选择 MEC 平台进行迁移来任务迁移优化策略。总体研究思路如下:在给定 MEC 平台数目的前提下,将移动终端选择 MEC 平台迁移的过程转化为最优停止问题,并利用最优停止理论求出最优数据迁移平均能耗,通过选择最优数据迁移平均能耗的 MEC 平台进行迁移,来降低迁移能耗和迁移时延。

本文第 2 节回顾相关研究工作;第 3 节进行问题描述和模型建立;第 4 节阐述具有能耗优化的任务迁移策略;第 5 节给出仿真实验并对实验结果进行分析;最后总结全文。

## 2 相关工作

近年来,为了节约移动终端的能耗,同时避免 MEC 平台上资源的浪费,许多研究者展开了对移动边缘计算下任务迁移能耗优化问题的研究。文献[8]将 MEC 系统的任务调度策略研究转化为双时间尺度随机优化问题,并增加功率为约束条件。为了降低任务迁移的延迟,同时减少能源消耗,文献[9-10]分别将任务计算迁移优化问题转化为凸优化和非凸非光滑的优化问题,并探讨了如何降低计算卸载的能耗等问题。文献[11]则研究了移动边缘计算中的能效与性能保证问题,认为更好的任务性能才是降低能耗的关键,为此提出了移动

边缘计算能耗最小化问题,并应用 KKT 条件来加以解决。文献[12]将计算卸载决策问题制定为边缘设备选择的问题,即寻找一个合适的边缘设备,并为此提出了一个联合计算和通信资源分配的模式。上述移动边缘计算环境下的任务迁移研究,往往将迁移对象设定为固定节点<sup>[8-10]</sup>,这样虽然可以降低研究的复杂度,但是随着移动边缘计算技术的广泛使用,单一边缘设备已不能满足用户的通信需求,因此任务迁移的研究应该转换到多 MEC 平台覆盖的通信环境下进行。

在许多优化问题上,最优停止理论作为高效的数学推导工具,一直被广泛使用<sup>[13-14]</sup>。文献[13]将数据的投递延迟作为优化目标,将遇到节点的平均时间与通过最优停止理论计算所获的阈值进行比较,有效地降低了投递延迟并提高了成功概率。文献[14]在基于固定传输时间的约束条件下,以数据传输的能效作为优化目标,通过比较侦测到的每一时刻的信道传输速率与使用最优停止理论计算的速率阈值来决定是否传输,从而提高了能量利用效率,同时降低了数据传输过程中的能源消耗。

在这些研究工作的基础上,本文主要研究多 MEC 平台服务场景下任务迁移能耗的优化问题,同时将最优停止理论与任务迁移过程相结合,提出具有能耗优化的任务迁移策略。与文献[14]中固定传输时间并依据最优速率阈值选择传输时刻不同,本文不限定迁移时间,并依最优数据迁移平均能耗对所侦测到的 MEC 平台进行选择,实现优化移动终端能耗并降低迁移时延的目标。

## 3 问题描述与模型建立

### 3.1 问题描述

在移动边缘计算环境下,移动终端通过访问信道即可获得其质量信息。若移动终端与多个 MEC 平台之间需要进行任务迁移,则建立无线链路后选择具有良好信道质量的平台进行迁移操作。本文的研究目标是 minimized 数据迁移的平均能耗,同时缩短迁移总时间。

在移动网络中,假设时间能够被划分成周期为  $T$  的时间间隙,同时移动终端周边设置了  $M$  个 MEC 平台,即迁移节点。移动终端在每个时间间隙  $T$  内能侦测到一个迁移节点,并为之建立一条无线链路,其链路信道增益  $g$  服从某种分布(文中以 Rayleigh 分布来对无线信道进行模拟)。此外,移动设备上运行的程序任务数据量为  $D$ ,将其平均分成大小为  $d$  的子任务后放入等待队列等候执行迁移操作,同时移动终端会以速率  $c$  生成新的数据。本文研究的任务迁移过程由侦测和迁移两个部分组成,故迁移总时间为节点侦测时间与任务在无线链路上传输时间的总和。移动终端每次侦测迁移节点的能耗为  $E_d$ ,当侦测到合适的节点后,任务开始迁移,传输功率为  $P$ ,该过程的持续时间  $t$  远大于侦测周期  $T$ 。由于在移动设备侦测迁移节点以及迁移过程中,移动终端一直在产生新的数据,其数据量为  $c(nT+t)$ ,因此迁移过程的数据总量为  $C=d+c(nT+t)$ ,其中  $t=C/R$ ,故整个迁移过程的能耗为  $E=nE_d+Pt$ 。显然,移动终端选择无线链路上迁移速率大的 MEC 平台进行迁移能够减少迁移能耗,同时缩短迁移时间。根据香农公式:

$$R = W \log_2 \left( 1 + \frac{g \cdot P}{N_0 \cdot W} \right) \quad (1)$$

由香农公式可知,信道传输速率  $R$  由信道的带宽  $W$ 、信道增益  $g$  与  $P/(N_0 \cdot W)$  构成的信噪比生成。移动终端需要选择信道增益  $g$  大、信道质量好的节点进行任务迁移,且必须时刻侦测与节点之间的无线链路信道情况,并选择拥有最好信道质量的 MEC 平台进行迁移。本文利用最优停止理论为移动终端的任务迁移寻找最优迁移节点。

### 3.2 模型建立

假设侦测过程中最大的侦测次数(即 MEC 平台数目)为  $M$ 。移动终端在子任务等待迁移的过程中始终会生成新的数据,故移动终端从开始侦测到选择某节点完成迁移,其迁移总数据量为  $C_{n-1} = d + c(nT + t)$ ,迁移时间  $t$  为  $C_{n-1}/R_{n-1}$ ;若移动终端不选择该节点进行迁移并继续侦测,则此刻数据量记为  $C_{n-1}^* = d + cnT$ 。当移动终端又继续侦测了  $n$  个节点并选择合适的节点完成迁移时,迁移数据总量为  $C_n = C_{n-1}^* + c(nT + t)$ ,传输时间  $t$  为  $C_n/R_n$ 。若  $C_{n-1}/R_{n-1} > C_n/R_n + nT$ ,则该节点可被选为迁移节点,反之则继续侦测。

由于在任务迁移过程中移动设备端仍会生成新数据参与迁移,本文基于迁移时间  $t$  和迁移总数据  $C_n$  的动态关系,引入迁移时间收益  $\alpha$  来判定是否选择当前节点进行迁移。

迁移时间收益  $\alpha$  为移动终端拟选择上个侦测节点进行迁移的迁移时间  $C_{n-1}/R_{n-1}$  与移动终端拟选择当前所侦测节点进行迁移的迁移总时间  $C_n/R_n + nT$  的差值,即:

$$\alpha = \frac{C_{n-1}}{R_{n-1}} - nT - \frac{C_n}{R_n} \quad (2)$$

当迁移时间收益  $\alpha \geq 0$  时,  $\alpha$  越大,则选择当前节点进行迁移的迁移总时间越短,并且能够节省更多的能耗。

另外,根据迁移时间  $t = C_n/R_n$  与迁移总数据  $C_n = C_{n-1}^* + c(nT + t)$  可以得到迁移时间  $t$  的通式:

$$t = \frac{C_{n-1}^* + cnT}{R_n - c} \quad (3)$$

联合式(2)、式(3),可得  $R_n$  的表达式:

$$R_n = \frac{C_{n-1}^* + cC_{n-1}/R_{n-1} - c\alpha}{C_{n-1}/R_{n-1} - \alpha - nT} \quad (4)$$

迁移策略以迁移时间收益  $\alpha$  作为选择节点的一个判定条件,当迁移时间收益  $\alpha \geq 0$  时,当前所侦测节点有资格被选为迁移节点。而当迁移时间收益  $\alpha = 0$ ,即  $C_{n-1}/R_{n-1} = C_n/R_n + nT$  时,根据式(4)可获得每个侦测时刻所侦测节点的最小迁移速率阈值  $R_{th,n}$ :

$$R_{th,n} = \frac{C_{n-1}^* + cC_{n-1}/R_{n-1}}{C_{n-1}/R_{n-1} - nT} \quad (5)$$

因此,只需要将所侦测节点的实际迁移速率  $R_n$  与对应的最小迁移速率阈值进行比较,即可决定该节点是否有资格被选为迁移节点。

## 4 具有能耗优化的任务迁移策略

### 4.1 能耗最小化最优停止规则问题的构建

本文研究中,移动终端最大侦测次数为  $M$ ,则侦测的最大时刻为  $MT$ ;假设移动终端停止侦测并进行迁移的时刻为  $n, n \in N$ ,其中  $N = \{N; 1 \leq N \leq M\}$  为停止时刻集。因为策略

需要先根据  $R_{th,n}$  进行迁移节点的选择,而满足该条件的节点可能不止一个,所以需要选择一个最优的节点作为迁移对象。因此,以数据迁移平均能耗  $\beta$  为标准,再次进行决策。

$$\beta = \frac{nE_d + Pt}{C_{n-1}^* + c(nT + t)} \quad (6)$$

若移动终端拟选择上次侦测到的 MEC 平台作为迁移节点进行任务迁移,则其数据迁移的平均能耗  $\beta$  为  $Pt/(C_{n-1}^* + ct)$ 。因此,只有符合  $\beta \leq Pt/(C_{n-1}^* + ct)$  的后继节点才能被考虑作为迁移节点。另外,设备在迁移的侦测过程产生的数据  $cnT \leq C_{n-1}^* + ct$ ,因此推导出  $\beta$  的范围为:

$$\frac{E_d}{cT} \leq \beta \leq \frac{Pt}{C_{n-1}^* + ct} \quad (7)$$

由式(7)构建一个选择最小化  $\beta$  的问题,以  $\alpha \geq 0$  为约束条件,将该问题描述为:

$$\min_{n \in N} \frac{E[nE_d + Pt]}{E[C_{n-1}^* + c(nT + t)]} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \alpha \geq 0$$

基于上述能耗最小化问题,需要继续推导出最优停止规则并找出最优能耗。根据式(8),将最优能效  $\beta^+$  定义为:

$$\beta^+ = \inf_{n \in N} \frac{E[nE_d + Pt]}{E[C_{n-1}^* + c(nT + t)]} \quad (9)$$

则最优平均数据能耗  $\beta^+$  的最优停止时刻为  $n^* = n(\beta^+)$ 。

$$n^* = \arg \inf_{n \in N} \frac{E[nE_d + Pt]}{E[C_{n-1}^* + c(nT + t)]} \quad (10)$$

联合式(8)和式(9),将以时间收益  $\alpha$  为约束条件的平均迁移数据能耗最小化问题转变为:

$$\min_{n \in N} E[X_n] = \min_{n \in N} \{E[nE_d + Pt] - \beta E[C_{n-1}^* + c(nT + t)]\} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \alpha \geq 0$$

### 4.2 最优停止规则的存在性证明与求解

若要对迁移数据最优能耗的最优停止规则问题进行求解,则必须证明该问题存在最优停止规则。

**命题 1** 式(11)存在最优停止规则。

证明:根据文献[15],最优停止规则如果存在,则必须先满足以下两个条件:

$$(A1) E\{\inf_n X_n\} < \infty \quad (12)$$

$$(A2) \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_n X_n \leq X_\infty \text{ a. s.}$$

对于式(11),令  $X_n = nE_d + Pt - \beta[C_{n-1}^* + c(nT + t)]$ 。因为  $\beta \leq Pt/(C_{n-1}^* + ct)$ ,所以  $X_n \geq nE_d - \beta cnT$ ;同时,  $\beta \geq E_d/(cT)$ ,且  $n \leq M$ ,所以  $X_n \geq -\infty$  成立。因此,条件(A1)满足。

当  $n \rightarrow \infty$  时,存在  $C_{n-1}^* \rightarrow \infty$ ,且  $nE_d \rightarrow \infty$  与  $cnT \rightarrow \infty$  成立,因此:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf_n X_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_n nE_d + Pt - \beta[C_{n-1}^* + c(nT + t)]$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_n nE_d$$

$$= \infty$$

显然  $X_n = \infty$ 。因此,条件(A2)满足。

综上,式(12)满足条件(A1)和(A2),因此最优停止规则存在。

根据文献[14],移动设备将侦测到的第  $n$  个 MEC 平台作为迁移节点的最小迁移率,将其设为:

$$V_n(\beta) = \min\{nE_d + Pt - \beta[C_{n-1}^* + c(nT+t)], V_{n+1}(\beta)\} \quad (13)$$

当设备停止在第  $n$  个设备上的最小迁移率小于或等于第  $n+1$  个设备的迁移率,即  $nE_d + Pt - \beta[C_0^* + c(nT+t)] \leq V_{n+1}(\beta)$  时,则设备停止观察。如果移动终端设备侦测到第  $M$  个 MEC 平台仍不符合需求,则必须停止侦测并将具备最大迁移速率  $R^{\max}$  的设备作为迁移节点。

被移动设备选择作为迁移节点的 MEC 平台所应具有的最小迁移速率阈值为:

$$R_{th,n} = \begin{cases} \frac{C_{n-1}^* + cC_{n-1}/R_{n-1}}{C_{n-1}/R_{n-1} - nT}, & n=1,2,3,\dots,M-1 \\ 0, & n=M \end{cases} \quad (14)$$

根据式(14)解得式(12)的最优停止规则为:

$$N^* = \min\{1 \leq n \leq M; R_{th,n}^* \leq R_n\} \quad (15)$$

当  $V^*(\beta^+) = 0$  时,最优停止规则存在的最优等式  $V^*(\beta^+) = E\{\min[nE_d + Pt - \beta^+(C_0^* + c(nT+t))], V^*(\beta)\}$  存在最优解,即:

$$0 = E\{\min[nE_d + Pt - \beta^+(C_0^* + c(nT+t))], 0\} \quad (16)$$

继续变换式(16)得:

$$0 = \min\{[E[n]E_d + Pt - \beta^+(C_{n-1}^* + c(E[n]T+t))], 0\} \quad (17)$$

因为边缘设备和移动终端处在相同无线网络环境下,所以给定无线网络信道链路增益随机变量  $G$ ,其迁移速率  $R$  在每个时刻  $T$  都符合同一函数分布。

迁移速率的概率密度为  $f_R(r)$ ,则迁移速率  $R$  的累积函数为  $\int_0^{R^{\max}} f_R(r)dr$ ,速率期望值为  $\int_0^{R^{\max}} r f_R(r)dr$ 。

设移动设备侦测到的第  $n$  个 MEC 平台的迁移速率为  $R_n$ ,则在该点停止侦测的累积分布函数为:

$$F_{R_n}(r) = \Pr[R_{n,N} \leq r \text{ 停止在 } n] = \begin{cases} F_R(r) - F_R(R_{th,n}^*), & R_{th,n}^* \leq r \\ 0, & R_{th,n}^* \geq r \end{cases} \quad (18)$$

那么,该 MEC 平台的迁移速率  $R_n$  的期望值为:

$$E[R_n] = \sum_{N=1}^M E[R_{n,N} | \text{停止在 } N] \varphi_n \quad (19)$$

其中,  $\varphi_n$  为移动设备在侦测到第  $n$  个 MEC 平台后停止侦测的概率。

$$\varphi_n = \left[ \prod_{j=1}^{n-1} F_R(R_{th,j}^*) \right] \cdot \int_{R_{th,n}^*}^{R^{\max}} f_r(r)dr \quad (20)$$

其中,  $\prod_{j=1}^{n-1} F_R(R_{th,j}^*)$  表示移动设备从侦测到的第 1 个到第  $n-1$  个边缘设备都不进行迁移的概率,  $\int_{R_{th,n}^*}^{R^{\max}} f_r(r)dr$  表示能在第  $n$  个设备进行迁移的概率。由式(18)和式(19)推导得到:

$$E[R_n] = \sum_{n=1}^M \left[ \int_{R_{th,n}^*}^{R^{\max}} \frac{r}{1 - F_R(R_{th,n}^*)} f_r(r)dr \right] \varphi_n \quad (21)$$

在求解  $E[R_n]$  的过程中,已经求得设备停止侦测的概率  $\varphi_n$ ,所以移动终端迁移的 MEC 平台序号的期望值为:

$$E[n] = \sum_{n=1}^M n \varphi_n \quad (22)$$

进而,求得迁移时间的期望值  $E[t]$  为:

$$E[t] = \frac{C_{n-1}^* + cE[n]T}{E[R_n] - c} \quad (23)$$

最后,将各参数代入式(12)中,求得  $\beta^+$  期望值的表达式:

$$E[\beta^+] = \frac{E[n]E_d + PE[t]}{C_{n-1}^* + cE[n]T + E[t]} \quad (24)$$

### 4.3 算法描述

本文提出的具有能耗优化的任务策略中,移动终端将最优平均数据迁移能耗  $E[\beta^+]$  作为判断依据去选择迁移节点,从而优化迁移过程的能耗。

首先,以迁移速率阈值  $R_{th,n}$  作为迁移节点的侦测筛选指标,如果迁移速率  $R_n$  小于阈值  $R_{th,n}$ ,直接否定迁移请求并继续侦测;如果  $R_n$  大于  $R_{th,n}$ ,则计算选择该节点进行迁移所具备的  $E[\beta]$  并将其与  $E[\beta^+]$  进行比较,若  $E[\beta]$  更大,则结束侦测并进行迁移,否则继续侦测并记录该节点的速率  $R^{\max}$ 。若侦测到第  $M$  个设备仍未迁移,则选择具备最大迁移速率  $R^{\max}$  的节点完成迁移。

详细迁移策略描述如下:

- 1) 初始化子任务  $d$ 、数据生成率  $c$ 、侦测能耗  $E_d$ 、迁移功率  $P$ 、MEC 平台数目  $M$ 、最大迁移速率  $R^{\max} = 0$ 、侦测节点序号  $i \in [1, M]$ ;
- 2) 开始侦测,  $i=1, R_s = R_i$ ;
- 3) 根据式(14)求出迁移速率阈值  $R_{th,n}$ ,再根据式(24)求出  $E[\beta^+]$ ;
- 4) 若  $R_i \geq R_{th,i}$ ,执行步骤 5),否则执行步骤 6);
- 5) 根据式(10)求出  $E[\beta]$ ,若  $E[\beta] \leq E[\beta^+]$ ,执行步骤 8),否则执行步骤 6);
- 6) 令  $R^{\max} = \max\{R^{\max}, R_i\}$ ,  $R_s = R^{\max}$ ,继续侦测,执行步骤 3);
- 7) 若  $i=M, R^{\max} = \max\{R^{\max}, R_M\}$ ,执行步骤 8);
- 8) 停止侦测,进行迁移。

移动终端依据迁移速率阈值  $R_{th,n}$  和最优的数据迁移平均能耗期望值  $E[\beta^+]$  对 MEC 平台进行侦测并迁移,可以减少迁移数据的时间并提高迁移能耗的利用率。

## 5 仿真结果与分析

在仿真实验中,由于移动终端和边缘设备之间的无线信道会有小尺度衰落,因此将 Rayleigh 信道衰落模型设定为实验环境的信道模型。在模拟实验中,假定移动终端设备和 MEC 平台之间信道状况的累积分布函数相同,同时移动终端每个周期都会侦测到一个 MEC 平台与终端之间的信道状况信息。当边缘设备被侦测到后,移动终端与该设备之间的迁移速率在这轮迁移过程结束之前都将保持不变。

根据文献[14]中给出的信道衰落模型增益概率密度以及式(1)的香农公式,得出传输速率  $R$  相对于最大速率  $R_{\max}$  的累积分布函数:

$$F_n = \frac{\exp\left(-\frac{(2\bar{w}-1)^2}{2\sigma^2 S_{NR}^2}\right)}{\exp\left(-\frac{(2\bar{w}^{\max}-1)^2}{2\sigma^2 S_{NR}^2}\right)} \quad (25)$$

其中,  $\sigma^2$  是信道增益方差相关值,  $g$  是信道增益。

仿真实验中的各参数及其取值如表 1 所列。

表1 仿真实验参数值

Table 1 Simulation experiment parameter value

参数	描述	取值
$W$	带宽/MHz	10
$P$	迁移功率/W	$1 \times 10^{-1}$
$\sigma$	信道增益均方差	1
$N_0$	噪声功率谱密度/(W/Hz)	$1 \times 10^{-6}$
$g$	信道增益	0~4

### 5.1 不同策略的性能对比与分析

本文中具有能耗优化的任务迁移策略是为求解最小化平均数据迁移能耗问题而提出的。为检验该策略在任务迁移过程的性能优劣,本文使用 Matlab 仿真工具对提出的迁移策略进行仿真实验,并从平均迁移数据总量、平均有效数据迁移率、平均迁移时间以及数据迁移平均能耗 4 个方面将其与其他传输策略进行对比分析。下面简要描述用于比较的两种迁移策略<sup>[14]</sup>。

(1)确定节点任务迁移策略 DNTMS(Determined Node Task Migration Strategy)。移动终端始终以侦测到的第一个边缘计算服务器作为迁移节点进行任务迁移。

(2)随机节点任务迁移策略 RNTMS(Random Node Task Migration Strategy)。移动终端设备以均等概率  $1/M$  随机选择某一个时刻侦测的边缘计算服务器作为迁移节点进行任务迁移。

### 5.2 平均数据迁移总量

在本文研究的系统模型中,移动终端在侦测节点和传输过程中又以速率  $c$  生成新的冗余数据。迁移的整体数据过大不仅会增加移动终端的能耗,而且会给 MEC 平台带来负担。因此,平均数据迁移总量越小,迁移性能越好。

从图 1 中看出,随着横坐标参数的增长,3 种策略迁移的总数据都会发生变化。其中,RNTMS 策略迁移数据总量的变化最大;DNTMS 策略是选择侦测到的第一个节点进行迁移,没有侦测其他迁移节点的过程,其迁移数据的增加量均是在迁移过程中产生;OSTMS 策略迁移的数据总量则与 RNTMS 策略大致相仿。在平均数据迁移总量这个指标对比上,OSTMS 策略与 RNTMS 策略的迁移性能较好。

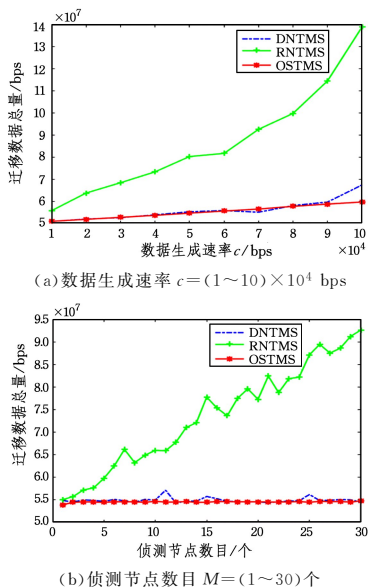


图1 迁移数据总量的变化情况

Fig. 1 Changes in total migration data

### 5.3 平均有效数据迁移率

平均有效数据迁移率是移动终端需要迁移的任务数据总量与实际迁移数据总量之比平均值。该值越大,任务迁移的有效率越高,迁移性能越好。

从图 2 可以看出,OSTMS 策略的平均有效数据迁移率最高,相较于其他两种策略能达到大约 10%~40% 的性能提升。DNTMS 策略与 OSTMS 策略也有相似的迁移率,唯独 RNTMS 策略随着参数的增加,有效数据迁移率越来越小,迁移性能逐渐变差。

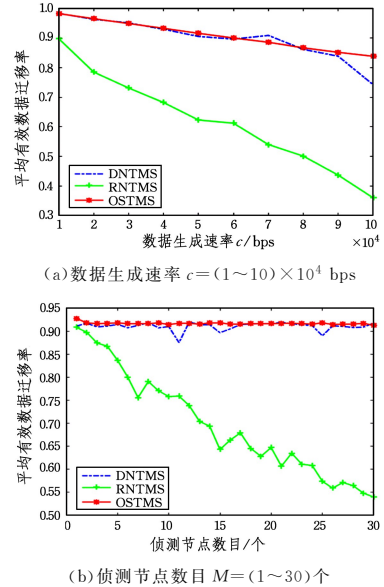


图2 有效数据迁移率变化情况

Fig. 2 Effective data mobility changes

### 5.4 平均迁移时间

平均迁移时间是指移动终端上等待迁移的任务数据完全迁移到边缘计算服务器的整个迁移过程持续时间的平均值。该值越大,则迁移过程的持续时间越长。

从图 3 可以看出,OSTMS 策略的平均迁移时间短于 DNTMS 策略和 RNTMS 策略的平均迁移时间,RNTMS 策略的平均迁移时间最长。任务迁移时间的长短不仅影响着设备的能源消耗,而且影响着用户的服务体验度。从平均迁移时间来看,OSTMS 策略具有更好的性能。

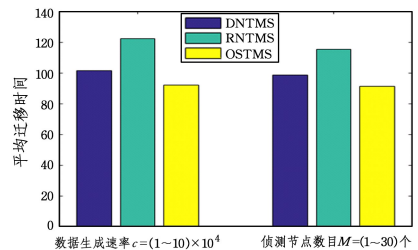


图3 平均迁移时间的对比

Fig. 3 Comparison of average migration time

### 5.5 数据迁移平均能耗

数据迁移平均能耗指任务迁移的平均迁移能耗与迁移总数据之比,能够有效反映出每比特数据所消耗的能量。数据单位迁移能耗越小,节能效果越佳。

从图 4 可以观察到,OSTMS 策略的数据迁移平均能耗

最低,即节能效果最好。因为 OSTMS 策略通过迁移时间收益公式获得移动终端周期性侦测的边缘计算服务器具备的迁移速率阈值以及最优数据迁移平均能耗,所以该策略能够让移动终端为每轮子任务准确地选出最优任务迁移节点,有效提高能量利用率。RNTMS 策略的数据迁移平均能耗最大,DNTMS 策略稍小,这是因为这两种策略没有考虑能量因素。

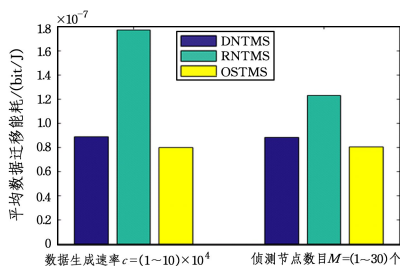


图4 数据迁移平均能耗的对比

Fig.4 Comparison of data migration average energy consumption

实验结果表明,OSTMS 策略在各迁移性能上均更优。综上所述,本文提出的具有能耗优化的任务迁移策略能有效缩短迁移总时间并提高迁移过程的能量利用率,保证在有效迁移的基础上优化迁移的性能。

**结束语** 针对移动边缘计算的任务迁移过程中移动终端能耗优化的问题,本文将最优停止理论与任务迁移过程相结合,提出了具有能耗优化的任务迁移策略。文中首先构建了一个时间收益模型,并通过该模型求解出每个时刻侦测到的边缘计算服务器具备的最优数据迁移速率阈值。然后以时间收益约束构建平均能效最小化的最优停止规则问题,并证明其存在性,同时求解出最优平均能效。在移动终端进行任务迁移之前,以最优平均能效来侦测迁移节点,从而减少迁移能耗和迁移时间。仿真实验表明,本文提出的策略能取得较短的迁移时间、较小的平均能耗以及较大的平均有效数据迁移率,具有较好的迁移性能提升效果。

针对子任务数据量不同的迁移情形,有效提高迁移过程中策略的性能将是进一步的研究工作。

## 参考文献

- [1] SHI W,DUSTDAR S. The Promise of Edge Computing [J]. Computer,2016,49(5):78-81.
- [2] SINGH S,CHIU Y C, TSAI Y H, et al. Mobile Edge Fog Computing in 5G Era: Architecture and Implementation[C]// 2016 International Computer Symposium (ICS). New York: IEEE, 2016:731-735.
- [3] AHMED A,AHMED E. A Survey on Mobile Edge Computing [C]// 10th IEEE International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO 2016). New York: IEEE, 2016: 2322-2358.
- [4] BECK M T,FELD S,LINHOFF-POPIEN C, et al. Mobile Edge Computing [J]. Informatik-Spektrum,2016,39(2):1-7.
- [5] LAGERSPEZ E. Mobile Search and the Cloud: The Benefits of

Offloading[C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing & Communications Workshops. New York: IEEE, 2011:117-122.

- [6] ZHANG H,ZHANG Q,DU X. Toward Vehicle-Assisted Cloud Computing for Smartphones [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2015,64(12):5610-5618.
- [7] YU B W,PU L J,XIE Y T, et al. Joint Task Offloading and Base Station Association in Mobile Edge Computing [J]. Journal of Computer Research & Development,2018,55(3):537-550.
- [8] LIU J,MAO Y,ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]// 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). New York: IEEE, 2016:1451-1455.
- [9] WANG C,LIANG C,YU F R, et al. Computation Offloading and Resource Allocation in Wireless Cellular Networks with Mobile Edge Computing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2017,16(8):4924-4938.
- [10] 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.
- [11] TAO X Y,OTA K,DONG M X, et al. Performance Guaranteed Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2017,6(6):774-777.
- [12] CHEN X,LI W Z,LU S L, et al. Efficient resource allocation for on-demand mobile-edge cloud computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2018,67(9):8769-8780.
- [13] ZHANG S F,HUANG D,CHEN Z, et al. Optimal Stopping Decision Method for Routing of Opportunistic Networks [J]. Journal of Software,2014(6):1291-1300.
- [14] PENG Y,WANG G C,HUANG S Q, et al. An Energy Consumption Optimization Strategy for Data Transmission Based on Optimal Stopping Theory in Mobile Networks [J]. Chinese Journal of Computers,2016,39(6):1162-1175.
- [15] FERGUSON T S. Optimal Stopping and Applications 2006[EB/OL]. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>.



**HU Jin-tian**, born in 1992, postgraduate. His main research interests include mobile edge computing and wireless networks.



**WANG Gao-cai**, born in 1976, Ph.D., Professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computer network and system performance evaluation and random.