

## 基于快速连续蚁群算法的 QoS 切换决策机制\*

周宇<sup>1</sup>, 王兴伟<sup>2</sup>, 李婕<sup>1</sup>, 黄敏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

<sup>2</sup>(东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110819)

<sup>3</sup>(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

通讯作者: 王兴伟, E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn



**摘要:** 随着人们对移动网络服务需求的日益增长,用户需要在复杂的异构网络中实现不同接入技术之间的无缝切换,因此选择总最佳连接并提供服务质量保证的切换决策成为下一代互联网研究的关键内容。为了更好地满足用户的需求,在综合考虑网络信息的不确定性、用户服务质量需求、用户偏好、用户愿意支付的费用以及网络供应商的收益等因素的前提下,设计了基于快速连续蚁群算法的切换决策机制,并引入协商博弈和 Nash 均衡思想来解决用户之间的串谋问题以保证切换决策的公平性。仿真结果表明,设计的切换决策机制在满足用户服务质量需求的同时,不仅使双方的效用最大,并且最契合用户的偏好,能够很好地解决下一代互联网中支持总最佳连接的切换决策问题。

**关键词:** 下一代互联网;总最佳连接;服务质量;切换决策;快速连续蚁群算法;效用

中文引用格式: 周宇,王兴伟,李婕,黄敏.基于快速连续蚁群算法的 QoS 切换决策机制.软件学报,2016,27(Suppl.2):291-300.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/16043.htm>

英文引用格式: Zhou Y, Wang XW, Li J, Huang M. The QoS supported handover decision scheme based on fast continuous ant colony algorithm. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(Suppl.2):291-300 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16043.htm>

## The QoS Supported Handover Decision Scheme Based on Fast Continuous Ant Colony Algorithm

ZHOU Yu<sup>1</sup>, WANG Xing-Wei<sup>2</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

<sup>2</sup>(College of Software, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

<sup>3</sup>(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** With the increasing demand for mobile network services, users need to realize the seamless handover between different access technologies in the complex heterogeneous networks, so the handover decision scheme with always best connected support and the quality of service has become the key research content of the next generation Internet. In order to satisfy users' demand, a handoff decision scheme is designed based on the fast continuous ant colony algorithm, considering the fuzzy network information, the user quality of service requirement, user preferences, charges that the user is willing to pay and the revenue of the network provider. The knowledge of negotiation game and Nash equilibrium concept are introduced to solve the collusion between users to ensure the fairness of the handoff decision. Simulation results show that the handoff decision scheme designed in this paper can meet the quality of service requirement of the user, maximize the utility of both sides

\* 基金项目: 国家杰出青年科学基金(61225012, 71325002); 国家自然科学基金(61572123, 61502092); 辽宁省百千万人才工程项目(2013921068); 中央高校基本科研业务费专项资金(N151604001); 中国博士后科学基金(2016M591449)

Foundation item: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (61225012, 71325002); National Natural Science Foundation of China (61572123, 61502092); Liaoning BaiQianWan Talents Program (2013921068); Fundamental Research Fund for the Central Universities (N151604001); General Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (2016M591449)

收稿时间: 2016-06-05; 采用时间: 2016-10-18

and best fit the user's preference, which has a better performance in solving the always best connected supported handoff decision problem in next generation Internet.

**Key words:** next generation Internet; always best connected; quality of service; handover decision; fast continuous ant colony algorithm; utility

## 1 引言

随着无线接入技术的不断发展,如何在复杂的异构网络中实现不同接入技术之间的无缝切换从而为用户提供支持总最佳连接(always best connected,简称 ABC)<sup>[1,2]</sup>和服务质量(quality of service,简称 QoS)<sup>[3-5]</sup>保证的通信服务,成为未来无线网络研究的重要问题.为保证在任何时间和任何地点终端用户都可以通过当前最佳接入网络使用下一代互联网(next generation Internet,简称 NGI),需要一个有效的接入网络选择机制.

目前的国内外的相关研究已经提出了许多切换决策方法,这些方法分别从不同的角度和侧重点来加以考虑.在文献[6]中,提出了一个基于模糊层次分析法(FAHP)、灰色关联分析(GRA)和逼近理想解排序法(TOPSIS)的评价模型,该模型用模糊层次分析法计算带宽、延迟、吞吐量以及偏好等 10 个指标的权重,并用 GRA 和 TOPSIS 混合法获得接入网络的排序以确定最佳接入网络.文献[7]提出了异构网络下的基于多指标优先级(PRMC)以及增强接入路由发现(EARD)的切换算法.该算法用 PRMC 来估计带宽、服务费用、包延迟、包抖动以及包丢失这 5 个指标的优先级.基于 EARD 方法根据各指标优先级以及流量类型进行网络的选择.文献[8]提出了一个基于上下文感知和体验质量(QoE)的垂直切换决策机制.它整合了所需要的敏感指标的阈值,并定义了一个决策函数来计算各个候选网络的性能以获得最佳选择方案.文献[9]是基于用户偏好的网络选择机制.该机制使用了各种不同的多指标决策算法(MADM),比如简单加权算法(SAW)、乘法指数加权算法(MEW)、逼近理想解排序法和 VIKOR 算法等,并根据计算出的网络得分来选择最优网络.文献[10]提出了一个基于效用的接入网络选择策略,该策略通过设计多个效用函数来寻求用户偏好和垂直切换决策之间的平衡.文献[11]提出了一个针对异构网络的用熵和 TOPSIS 方法估计 QoS 变量权重值的网络切换机制.文献[12]提出了一个基于流量管理算法的切换决策机制.该机制可以根据接入点的负载状况自适应地控制切换时间从而获得更好的 QoS.文献[13]设计了一种简单且经济效益高的基于上下文感知的切换管理策略.该策略根据接入点的负载以及特定服务的带宽占用状况进行切换,并且针对不同类型的服务均提供 QoS 和 QoE 保证.文献[14]提出了一个生物启发式模型来解决异构网络下的网络切换决策问题.该模型受细胞在动态环境中对于变化的自适应性和鲁棒性的启发,可以保证用户的 QoS 需求、网络资源合理分配以及使面向 QoS 的切换决策机制适应动态的无线网络环境.文献[15]提供了一个针对下一代无线网络的提供端到端 QoS 保证的切换机制.文献[16]提出了一个基于异构无线网络的 QoS 协商垂直切换决策模式,目的是在向用户提供增强的 QoS 的同时最大化网络收益.

上述算法大都针对应用的 QoS 需求和 QoE 需求、流量类型以及用户偏好等对切换决策机制进行分析研究,但未能充分考虑 ABC 情形下的切换决策因素,没有兼顾用户和网络供应商双方的利益.随着网络运营越来越商业化,进行网络切换时要兼顾用户和网络供应商的利益,达到双方效用的最大化,同时要实现 ABC 支持型的切换.ABC 支持型的切换决策问题需要确定一个把  $N$  个终端用户切换到  $M$  个接入网络的最佳方案,并且在该方案下用户和网络供应商的效用达到或接近 Nash 均衡的 Pareto 最优.该问题是一个 NP 完全问题.本文在综合考虑上述各种因素的情况下,提出了一个基于快速连续蚁群算法的求解切换决策问题的最佳方案.快速连续蚁群算法引入混沌序列进行初始化,并通过侦察蚁与觅食蚁的相互协作来寻找最优解.该算法在收敛速度大幅提升的基础上提高了寻优精度.

## 2 网络模型

本文采用层次网络结构,并且移动主机必须通过固定的接入点或基站接入网络,而不能通过其他移动主机接入网络.由以上假设作为前提,建立如下网络模型.

### 2.1 接入网模型

对接入网络  $i$  进行刻画变量包括接入网络供应商标识  $PI_i \in PIS$  ( $PIS$  是接入网络供应商标识集合)、接入网络

类型标识  $TI_i \in TIS$  ( $TIS$  是接入网络类型标识集合)、接入网络编码制式标识  $CI_i \in CIS$  ( $CIS$  是接入网络编码制式集合)、接入网络覆盖范围标识  $CA_i$ 、接入网络支持终端最高移动速率  $MV_i$ 、接入网络支持的应用类型集合  $NAS_i$ 、接入网络总带宽  $TB_i$ 、接入网络当前可用带  $AB_i$ 、接入网络支持的频谱范围  $FR_i$  和发射功率  $PPw_i$ 。

## 2.2 服务策略模型

接入网络  $i$  针对的应用类型  $j$  有  $K$  种服务策略。用来刻画服务策略的变量包括带宽  $Bw$ 、本地延迟  $DI$ 、本地延迟抖动  $Jt$ 、本地出错率  $Er$ 、本地安全度  $Se$ 、成本  $Ct$  以及定价  $Pr$ 。本文的实现过程中,接入网络  $i$  针对每一种服务类型  $j$  最多提供 4 种级别的服务策略,每个策略用一个六元组表示:

$$policy_{ijk} = \langle g_{bw\_ijk}, g_{dl\_ijk}, g_{jt\_ijk}, g_{er\_ijk}, g_{se\_ijk}, Pr_{ijk} \rangle \quad (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq |NAS_i|, 1 \leq k \leq K).$$

## 2.3 移动终端模型

用来刻画移动终端  $t$  的参数包括终端支持的应用类型集合  $TAS_t$ 、终端支持的编码制式集合  $MCS_t$ 、终端工作频率  $WF_t$ 、终端接收最低信号强度  $RS_t$ 、终端当前运动速率  $CV_t$ 、终端电池容量  $TBC_t$ 、终端当前剩余电量  $RC_t$ 、用户愿付最大单价  $HP_t$ 、通信质量级别  $QL_t$ 、终端用户  $t$  的接入网络供应商偏好序列  $PP_t$  以及接入网络编码制式偏好序列  $PC_t$ 。

## 3 数学模型

在计算终端用户对本地 QoS 服务策略的满意程度时,需要考察本地 QoS 评价以及全局 QoS 评价。

### 3.1 本地 QoS 评价模型

假设终端用户  $i$  针对应用类型  $j$  的候选策略集合为  $R = \{r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{ij}, \dots\}$ , 基于灰色关联分析法<sup>[17]</sup> 计算每条服务策略的本地 QoS 评价。首先计算终端用户对策略  $r_{ij}$  关于属性  $p$  的满意度  $v_{ij}^p$ , 该满意度是考虑权重  $w_i$  的加权模糊满意度, 然后确定属性  $p$  的最大加权模糊满意度  $v_p(r_*)$ , 最后计算策略  $r_{ij}$  至理想策略  $r_*$  的灰色关联度, 将灰色关联度作为此方案的本地 QoS 评价, 如式(1)所示。

$$L(r_{ij}) = \frac{1}{5} \sum_{p=1}^5 \left| \frac{\min_i |v_{ij}^p - v_*^p| + 0.5 \max_i |v_{ij}^p - v_*^p|}{|v_{ij}^p - v_*^p| + 0.5 \max_i |v_{ij}^p - v_*^p|} \right| \quad (1)$$

### 3.2 全局 QoS 评价

接入网络提供的策略满足端到端 QoS 需求的评价值如式(2)所示。

$$O(r_{ij}) = \omega_{bw} \cdot f(bw_{ij}) + \omega_{dl} \cdot f(dl_{ij}) + \omega_{jt} \cdot f(jt_{ij}) + \omega_{er} \cdot f(er_{ij}) + \omega_{se} \cdot f(se_{ij}) \quad (2)$$

其中,  $f(u)$  表示属性  $u$  的端到端需求的程度。根据式(1)和式(2), 得到候选接入网络  $i$  提供的服务策略  $r_{ij}$  的用户 QoS 满意度:

$$SQ(r_{ij}) = L(r_{ij}) \cdot O(r_{ij}) \quad (3)$$

对于 QoS 参数权重计算, 由于不同应用对不同 QoS 参数具有不同的要求, 因此, 需要根据应用需求自适应地设定权重。本文用文献[18]中的相容矩阵分析法来计算 QoS 参数的权重。

## 4 博弈模型

### 4.1 成本与定价

对接入网络为终端用户提供的服务策略  $r_{ij}$ , 接入网络的成本定义为式(4)。

$$Ct_{ij} = pb_i^0 \cdot Bw_{ij} \quad (4)$$

其中,  $pb_i^0$  为单位带宽资源价格,  $Bw_{ij}$  是服务策略  $r_{ij}$  实际提供的带宽。接入网络供应商对接入网络为终端用户提供的服务策略  $r_{ij}$  的定价为式(5)。

$$Pr_{ij} = \lambda_i \cdot pb_i \cdot Bw_{ij} \tag{5}$$

其中,  $pb_i$  为带宽资源单价,  $\lambda_i$  为价格浮动系数, 受安全度的级别影响. 安全度为  $g_{se,t}$ , 则对应的价格浮动系数为  $\lambda_{it}$ .

### 4.2 协商博弈

博弈论是研究决策主体行为发生直接相互作用时的决策以及这种决策的均衡问题的理论, 通常有两个或两个以上的参与者<sup>[19]</sup>. 本文的博弈过程中有接入网络供应商间的博弈、终端用户间的博弈以及接入网络供应商与终端用户的博弈<sup>[20]</sup>, 见表 1 和表 2. 同时, 参与博弈的终端用户之间和接入网络供应商之间均可能有合作串通行为, 以谋取更大利益.

**Table 1** The game of the end users

**表 1** 终端用户博弈

	合作	不合作
合作	$U_1+R_1-C_1, U_1+R_1-C_1$	$(U_1-C_1, U_1)$
不合作	$(U_1, U_1-C_1)$	$(U_1, U_1)$

**Table 2** The game of the network providers

**表 2** 接入网络供应商博弈

	合作	不合作
合作	$U_2+R_2-C_2, U_2+R_2-C_2$	$(U_2-C_2, U_2)$
不合作	$(U_2, U_2-C_2)$	$(U_2, U_2)$

在表 1 中,  $U_1$  表示终端用户在选择“不合作”策略时的营运收益;  $R_1$  表示终端用户的合作收益;  $C_1$  表示终端用户的合作成本. 在表 2 中,  $U_2$  表示接入网络供应商的营运收益;  $R_2$  表示接入网络供应商的合作效益;  $C_2$  表示接入网络供应商的合作成本.

用  $r_{ij}$  表示接入网络  $i$  为终端用户  $t$  提供的应用类型  $j$  的 QoS 服务策略. 接入网络  $i$  和终端用户  $t$  针对  $r_{ij}$  进行博弈. 终端用户有两个策略:  $a_1$  (终端用户接受) 和  $a_2$  (终端用户拒绝), 接入网络有两种策略:  $b_1$  (接入网络接受) 和  $b_2$  (接入网络拒绝). 终端用户和接入网络供应商间的博弈根据实际情况分成如下 4 种情形来讨论.

- (1) 参加博弈的用户有合作串通行为, 而网络供应商不串通.
- (2) 参加博弈的网络供应商有合作串通行为, 而用户不串通.
- (3) 参加博弈的双方均有合作串通行为.
- (4) 参加博弈的双方均无合作串通行为.

**Table 3** Game situation 1

**表 3** 博弈情形 1

	$b_1$	$b_2$
$a_1$	$(U_1+R_1-C_1, U_2-\alpha)$	$(U_1+R_1-C_1, -\nu(U_2-\alpha))$
$a_2$	$(-\nu(U_1+R_1-C_1), U_2-\alpha)$	$(-(U_1+R_1-C_1), -(U_2-\alpha))$

**Table 4** Game situation 2

**表 4** 博弈情形 2

	$b_1$	$b_2$
$a_1$	$(U_1-\beta, U_2+R_2-C_2)$	$(U_1-\beta, -\nu(U_2+R_2-C_2))$
$a_2$	$(-\nu(U_1-\beta), U_2+R_2-C_2)$	$(-(U_1-\beta), -(U_2+R_2-C_2))$

**Table 5** Game situation 3

**表 5** 博弈情形 3

	$b_1$	$b_2$
$a_1$	$(U_1+R_1-C_1, U_2+R_2-C_2)$	$(U_1+R_1-C_1, -\nu(U_2+R_2-C_2))$
$a_2$	$(-\nu(U_1+R_1-C_1), U_2+R_2-C_2)$	$(-(U_1+R_1-C_1), -(U_2+R_2-C_2))$

Table 6 Game situation 4

表 6 博弈情形 4		
	$b_1$	$b_2$
$a_1$	$(U_1, U_2)$	$(U_1, -\nu U_2)$
$a_2$	$(-\nu U_1, U_2)$	$(-U_1, -U_2)$

$$U_1 = \frac{HP_t - Pr_{ij}}{HP_t}, U_2 = \frac{Pr_{ij} - Ct_{ij}}{Pr_{ij}}, \alpha \text{ 表示终端用户之间合作串通给接入网络供应商造成的损失, } \beta \text{ 表示接入网}$$

络供应商之间合作串通给终端用户造成的损失,负号表示接入网络、供应商未提供该 QoS 服务策略而要失去的收益,  $\nu$  为惩罚因子,  $\nu > 1$ ,  $-\nu U_1$  表示接入网络供应商拒绝向终端用户提供服务造成的负面影响. 对于终端用户, 负号和  $\nu$  的含义与接入网络供应商的相同.  $U_{MT}$  和  $U_{NET}$  分别表示终端用户和接入网络供应商在相应策略下的博弈收益. 如果下列不等式成立, 则  $(U_{MT}(a_*, b_*), U_{NET}(a_*, b_*))$  为 Nash 均衡解.

$$\begin{cases} U_{MT}(a_*, b_*) \geq U_{MT}(a_i, b_*) \\ U_{NET}(a_*, b_*) \geq U_{NET}(a_*, b_j) \end{cases} \quad i, j = 1, 2 \quad (6)$$

## 5 效用计算

### 5.1 终端用户效用

根据终端用户采用的策略的定价以及终端用户所能接受的最高定价, 可以得到终端用户的效用函数:

$$U_u(r_{ij}) = \alpha \cdot [\omega_{SQ} \times SQ(r_{ij}) + \omega_{SR} \times SR(r_{ij}) + \omega_{ST} \times ST(r_{ij}) + \theta_1 \times \omega_{SM} \times SM(r_{ij}) + \theta_2 \times \omega_{SW} \times SW(r_{ij})] \cdot \frac{HP_t - Pr_{ij}}{HP_t} \quad (7)$$

其中,  $\alpha$  是惩罚因子, 用以反映策略是否为 Nash 均衡解. 如果该策略是 Nash 均衡解,  $\alpha = 1$ , 否则,  $0 < \alpha < 1$ .  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别表示是否考虑终端用户对覆盖范围较大、发射功率较大的接入网络的偏好.  $HP_t$  为移动终端所能接受的最高价格.  $Pr_{ij}$  是策略定价.  $SQ(r_{ij})$ 、 $SR(r_{ij})$ 、 $ST(r_{ij})$  和  $SM(r_{ij})$  分别是终端用户对接入网络供应商、接入网络编码制式、网络覆盖范围以及电池电量的偏好值.  $SQ(r_{ij})$  是策略  $r_{ij}$  的 QoS 满意度, 且满足  $\omega_{SQ} + \omega_{SR} + \omega_{ST} + \omega_{SM} + \omega_{SW} = 1$ .

$$SR(r_{ij}) = \left( \frac{1}{|PIS| - 1} \right)^2 (i - |PIS|)^2 \quad (8)$$

其中,  $i$  是策略  $r_{ij}$  所属网络在序列  $PP_t$  中的位置序号.

$$ST(r_{ij}) = \left( \frac{1}{|CIS| - 1} \right)^2 (i - |CIS|)^2 \quad (9)$$

其中,  $i$  是策略  $r_{ij}$  所属网络在序列  $PC_t$  中的位置序号.

$$SM(r_{ij}) = \left( \frac{1}{|TIS| - 1} \right)^2 (i - |TIS|)^2 \quad (10)$$

其中,  $i$  是接入网络覆盖范围类型标识号.

$$SW(r_{ij}) = \begin{cases} \left( \frac{PPW_{th} - PPW_t}{PPW_{th}} \right)^\beta, & PPW_t \leq PPW_{th} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $PPW_t$  为接入网络的发射功率.

### 5.2 接入网络供应商效用

根据策略定价以及成本, 可以得到接入网络供应商的效用函数为

$$U_p(r_{ij}) = \alpha \cdot \rho \cdot \frac{Pr_{ij} - Ct_{ij}}{Pr_{ij}} \quad (12)$$

## 6 算法设计

蚁群算法用于解决函数优化时存在收敛速度慢并易于陷入局部最小等问题.为此,根据对真实蚂蚁的最新研究成果,文献[21]提出了一种求解函数优化问题的快速连续蚁群算法.该算法结合混沌序列进行初始化种群分布,利用一组侦察蚁进行大步长全局搜索,再由觅食蚁在侦察蚁找到的全局较好解附近进行局部优化,从而加速收敛,提高求解精度.本文设计了基于快速连续蚁群算法的 QoS 切换决策机制,具体设计如下.

### 6.1 蚁群位置初始化

利用式(9)产生混沌序列,其中  $\mu \in [3.56, 4.0]$ ,  $L(i) \in (0, 1)$ ,  $i=1, 2, \dots, d$ .

$$L(i+1) = \mu \cdot L(i)(1 - L(i)) \quad (13)$$

### 6.2 适应值函数

$$f = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{U_{u_i}} + \frac{1}{U_{p_i}} \right) \quad (14)$$

其中,  $n$  表示发起切换请求的终端用户数目,  $U_{u_i}$  和  $U_{p_i}$  分别表示终端用户和接入网络供应商效用值.

### 6.3 运算规则

将终端用户可接入的网络及服务策略进行捆绑编号  $Num_k = \{1, 2, \dots, L_k\}$ ,  $L_k$  表示终端用户  $k$  可选择的最大接入捆绑编号,从而得到蚂蚁  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{in})$ ,  $x_{ik} \in Num_k$ . 为了便于操作,在算法中将对蚂蚁个体每维的操作转化为对捆绑编号的计算.  $\max_{ik}$  和  $\min_{ik}$  分别为侦察蚁  $X_i$  的第  $k$  分量的取值上下限,也就是终端用户  $k$  可接入的网络及服务策略捆绑编号的最大值和最小值.

### 6.4 切换决策机制流程

步骤 1. 构造终端用户  $i(1 \leq i \leq n)$  的可接入网络集合  $SetC_i$ .

步骤 2. 针对终端用户  $i$  要求的应用类型  $j$ , 构造其候选服务策略集合  $SetCP_{ij}$ .

步骤 3. 初始化侦察蚁个数  $m$ , 最大迭代次数  $N_{max}$ , 当前迭代次数  $Nc=1$ .

步骤 4. 对于任意侦察蚁  $i(i=1, 2, \dots, m)$ , 在定义域范围内根据混沌序列生成初始解  $X_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ .

步骤 5. 针对每一侦察蚁, 对个体的每个分量进行博弈.

步骤 6. 计算每只侦察蚁的评价函数值  $v_i=f(X_i)$ , 根据目标函数确定初始信息素的大小:

$$\Delta\tau(i) = e^{-f_{new}(X_i)} \quad (15)$$

令  $v^* = \min(v_1, v_2, \dots, v_m)$ ,  $s^*$  为  $v^*$  所对应的蚂蚁位置.

步骤 7. 当前蚂蚁所在位置信息素大小为  $\tau(i)$ , 根据  $\tau_{best} = \max(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$ , 找到当前最优解  $V_{best}$ .

步骤 8. 对于侦察蚁  $i(i=1, 2, \dots, m, i \neq j)$ , 进行全局寻优, 转移概率公式为

$$p(i, j) = \frac{e^{\tau(j) - \tau(i)}}{e^{\tau(j)}} \quad (16)$$

其中,  $j$  为本代精英蚂蚁.  $X_j(j \in (1, m))$  为本代精英蚂蚁所在位置,  $X_i(i=1, 2, \dots, m)$  为侦察蚁的位置, 每迭代 1 次, 侦察蚁将得到侦察到的最好解  $X_i$ .

$$X_i = \begin{cases} X_i, & \text{if } f(X_i) < f(X_j) \\ X_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

步骤 9. 觅食蚁进行局部搜索, 若满足如下条件:

$$X_g^{new} = \begin{cases} X_l, & \text{if } \tau(X_l) > \tau(X_g) \text{ and } f(X_l) < f(X_g) \\ X_g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

则觅食蚁全局迁移到侦察蚁得到的更好解附近,进行新的局部搜索.其中,  $X_g^{new}$  是觅食蚁迁移后的新位置,  $X_l$  是侦察蚁侦察到的新位置,  $X_g$  是觅食蚁迁移前的位置.  $\tau(X_l)$  和  $\tau(X_g)$  分别为  $X_l$  和  $X_g$  区域的信息素浓度,  $f(X_l)$  和  $f(X_g)$  分别为  $X_l$  和  $X_g$  的适应值.否则,在原先位置处  $X_g$ ,进行局部搜索,根据搜索位置更新  $v^*$  和  $s^*$ ,最后算法输出的最好解  $s^* = X_g^{new}$ .

步骤 10. 对每只侦察蚁进行信息素更新:

$$\tau(i) = \rho \cdot \tau(i) + \Delta\tau(i) \quad (19)$$

步骤 11.  $N_c = N_c + 1$ , 如果  $N_c > N_{max}$ , 转步骤 12, 否则, 转步骤 7.

步骤 12. 将  $s$  作为最优解返回.

## 7 仿真实现与性能评价

本文采用(network simulator 2,简称 NS2)以及 3 个不同类型接入网络重叠覆盖的六角形蜂窝拓扑对前述切换机制进行仿真实现.本文的基准算法采用基于贪心算法<sup>[22]</sup>的切换决策机制(简称机制 2)和基于 AHP 和 GRA 算法<sup>[23]</sup>的切换决策机制(简称机制 3).利用这两种算法和本文设计的切换决策机制(简称机制 1)对用户方效用值、网络供应商效用值、双方效用和、Nash 均衡解所占比例、用户 QoS 满意度、用户价格满意度、接入网络供应商偏好满足度、接入网络编码制式偏好满足度在不同切换终端数下进行性能比较.结果如图 1~图 8 所示.

由图 1~图 3 可以看出,机制 1 的效用值远高于机制 2 和机制 3.这是因为,机制 1 的优化目标即为公平分配下双方效用的最大化;而机制 2 仅追求蜂窝网络的负载量,机制 3 仅追求 QoS 满意度,都未考虑用户偏好、速度适应性等相关因素的影响.

由图 4 可以看出,机制 1 的 Nash 均衡解所占比例远高于机制 2 和机制 3.这是因为,机制 1 的优化目标中考虑了公平性对切换的影响,对不满足公平性的解,在迭代工程中进行了剔除.而机制 2 和机制 3 并未考虑公平性的影响.

由图 5 可以看出,机制 3 的性能最好,机制 1 的性能次之,机制 2 最差.这是因为,机制 3 的直接优化目标为用户 QoS 满意度最大化;机制 1 的优化目标是在保证基本 QoS 需求的情况下,追求双方的效用最大化,通过效用间接反映对用户 QoS 的满足,因此仅就 QoS 满意度而言不及机制 3.机制 2 完全没有考虑用户的 QoS 满意度,而只考虑了网络负载的均衡,因而满意度远不及机制 1.

由图 6~图 8 可以看出,机制 1 的用户价格满意度、接入网络供应商偏好满足度、接入网络编码制式偏好满足度远高于机制 2 和机制 3.这是因为,在机制 1 的优化目标中考虑了以上因素对用户决策的影响;而机制 2 和机制 3 并未考虑这一因素的影响.

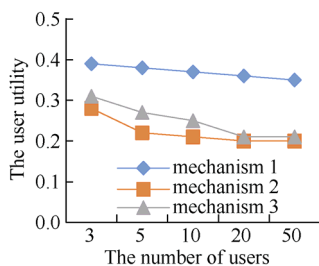


Fig.1 The comparison of user utilities

图 1 用户方效用值比较

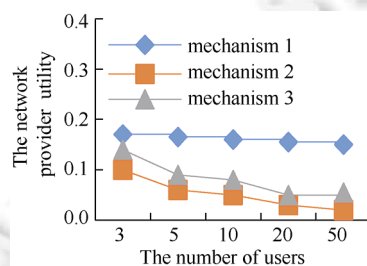


Fig.2 The comparison of network provider utilities

图 2 网络供应商效用值比较

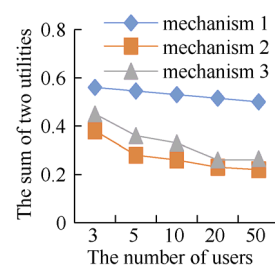


Fig.3 The comparison of the sum of two utilities

图 3 双方效用和比较

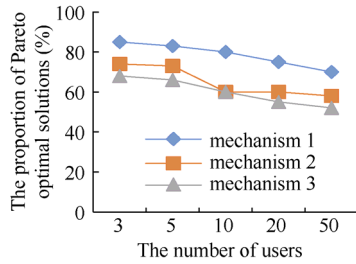


Fig.4 The proportion of Nash equilibrium solutions

图4 Nash 均衡解所占比例

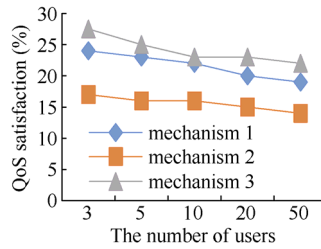


Fig.5 The comparison of users' QoS satisfaction

图5 用户 QoS 满意度比较

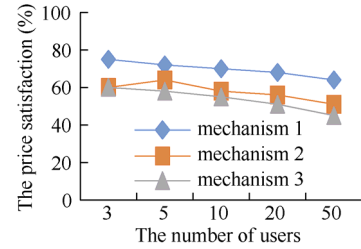


Fig.6 The comparison of users' price satisfaction

图6 用户价格满意度比较

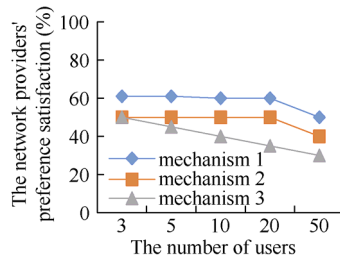


Fig.7 The comparison of network providers' preference satisfaction

图7 接入网络供应商偏好满足度比较

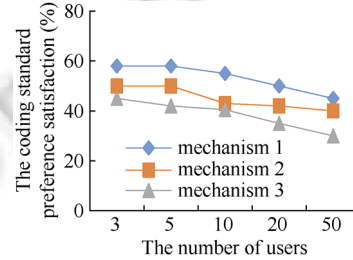


Fig.8 The comparison of network coding standard preference satisfaction

图8 接入网络编码制式偏好满足度比较

## 8 结 论

本文设计了基于快速连续蚁群算法的 QoS 切换决策机制.针对网络和移动终端状态,对接入网络、服务策略以及移动终端进行了刻画,应用模糊数学相关知识设计了数学模型.在满足用户 QoS 需求的基础上,将多项用户偏好直接作用于用户的效用函数,以引导用户对接入网络进行选择.为了平衡用户和网络供应商的利益,在选择接入网络的过程中引入协商博弈,综合考虑用户和网络供应商的效用,利用 Nash 均衡使切换决策达到公平和全赢的目标.

本文设计的切换决策机制尚有待改进和完善的地方.首先,本文所设计的机制在刻画“最佳”时,综合考虑了用户的 QoS 需求、用户对网络和供应商的偏好、对覆盖范围的偏好、对耗电程度的偏好、双方效用以及公平性等因素,在下一步工作中可以通过不断地完善“最佳”的定义来体现用户的实际需求.其次,本文对于各博弈情形下双方受益的计算,是按照市场实际运行该合作的情况下双方实际的收益,但作为整个智能系统而言,如果对作弊的一方采取直接方式对其收益进行减免,则会更加有利于整个系统的良性发展.

## References:

- [1] Kristiansson J. Creating always-best-connected multimedia applications for the 4th generation wireless systems. Licentiate Thesis, 2004.
- [2] Fotheringham V, Sharma C. Always best connected. IEEE Wireless Communications, 2003,10(1):49-55.
- [3] Wang XW, Qu DP, Huang M, Li KQ, Sajal K. Das, Zhang JH, Yu RY. Multiple many-to-many multicast routing scheme in green multi-granularity transport networks. Computer Networks, 2015,93(Part 1):225-242.
- [4] Wang XW, Cheng H, Huang M. QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm. Expert Systems with Applications, 2014,41(10):4513-4528.



- [5] Wang XW, Cheng H, Huang M. Multi-Robot navigation based QoS routing in self-organizing networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013,26(1):262–272.
- [6] Sasirekha V, Chandrasekar C, Ilangkumaran M. Heterogeneous wireless network vertical handoff decision using hybrid multi-criteria decision-making technique. *Int'l Journal of Computational Science & Engineering*, 2015,10(3):263–280.
- [7] Abdullah RM, Abdullah A, Hamid NAWA, Othman M, Subramaniam S. A network selection algorithm based on enhanced access router discovery in heterogeneous wireless networks. *Wireless Personal Communications*, 2014,77(3):1733–1750.
- [8] Sassi M, Mériem A, Sami T. Handover decision in heterogeneous networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications*. 2016. 588–595.
- [9] Manisha, Singh NP. Optimal network selection using MADM algorithms. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*. IEEE, 2015.
- [10] Ormond O, Murphy J, Muntean G. Utility-Based intelligent network selection in beyond 3G systems. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2006)*. IEEE, 2006. 1831–1836.
- [11] Kiran A, Brahmjit S, Rajesh K. Network selection based on weight estimation of QoS parameters in heterogeneous wireless multimedia networks. *Wireless Personal Communications*, 2014,77(4):3027–3040.
- [12] Rashmi KS, Mundavad MD, Niradi SB. Quality of service during handover in heterogeneous wireless network. *Int'l Journal of Computer Applications*, 2014,97(22):29–34.
- [13] Sarma A, Chakraborty S, Nandi S. Context aware handover management: Sustaining QoS and QoE in a public IEEE 802.11e hotspot. *IEEE Trans. on Network & Service Management*, 2014,11(4):530–543.
- [14] Tian D, Zhou J, Qi H, He A. A bio-inspired QoS-oriented handover model in heterogeneous wireless networks. *Journal of Applied Mathematics*, 2014,2014(5):1–13.
- [15] Jadhav SK. QoS-Based handover for next generation wireless networks [Ph.D. Thesis]. University of Otago, 2014.
- [16] Song QAJ. A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems. *European Journal of Operational Research*, 2008,191(3):1059–1074.
- [17] Lü DG, Wang L, Zhang P, Wang GY. Grey relational degree method for fuzzy multiple attribute decision making of structural scheme design. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007,39(6):841–844 (in Chinese with English abstract).
- [18] Ye YC. *System Comprehensive Evaluation Technology and its Application*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006 (in Chinese).
- [19] Fudenberg D, Tirole J. *Game theory*. MIT Press Books, 1991,1(7):841–846.
- [20] Zhang MH. Evolution analysis of the choice of game cooperation strategies for two types of enterprises. *Statistics and Decision Making*, 2007,(23):51–53 (in Chinese with English abstract).
- [21] Ma W, Zhu QB. Fast continuous ant colony algorithm for solving function optimization problems. *Acta Electronica Sinica*, 2008,36(11):1211–1212 (in Chinese with English abstract).
- [22] Hu YJ, Zhu JK. CDMA multi user detection based on greedy algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2003,39 (in Chinese with English abstract).
- [23] Song Q, Jamalipour A. A network selection mechanism for next generation networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. IEEE, 2005,2:1418–1422.

#### 附中文参考文献:

- [17] 吕大刚,王力,张鹏,王光远.结构方案设计模糊多属性决策的灰色关联度方法.哈尔滨工业大学学报,2007,39(6):841–844.
- [18] 叶义成.系统综合评价技术及其应用.北京:冶金工业出版社,2006.
- [20] 张默含.两类企业博弈合作策略选择的演化分析.统计与决策,2007,(23):51–53.
- [21] 马卫,朱庆保.求解函数优化问题的快速连续蚁群算法.电子学报,2008,36(11):1211–1212.
- [22] 胡艳军,朱近康.基于贪心算法的 CDMA 多用户检测.计算机工程与应用,2003,39.



周宇(1993-),女,辽宁大连人,硕士,主要研究领域为 SDN 中的网元布控.



李婕(1982-),女,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为认知网络,移动网络计算.



王兴伟(1968-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为互联网,云计算,网络空间安全.



黄敏(1968-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为物流与供应链管理,智能优化.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn