

基于模糊逻辑的多终端协同的垂直切换决策算法

任焱晔¹, 赵季红^{1,2}, 曲桦¹

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对异构网下多终端协同的垂直切换决策问题, 提出一种基于模糊逻辑和层次分析法的垂直切换决策算法, 它分为 2 部分: 切换时机的判断和虚拟终端的构建。首先采用模糊逻辑判断切换的时机, 然后采用层次分析算法与简单加权求和结合的方法选择虚拟终端的最优构成方式。仿真结果表明, 算法能够降低切换次数和不必要切换率, 并且能够充分体现应用需求和用户偏好。

关键词: 异构网; 多终端协同; 虚拟终端; 垂直切换决策; 模糊逻辑

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)09-0067-12

Vertical handoff decision algorithm for cooperation of multi-terminal based on fuzzy logic terminal

REN Gong-ye¹, ZHAO Ji-hong^{1,2}, QU Hua¹

(1. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Telecommunication & Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to solve the problem of vertical handoff decision for cooperation of multi-terminal, a fuzzy logic and AHP (analytic hierarchy process) based vertical handoff decision algorithm was proposed, which included the decision of the moment of triggering handoff and the construction of virtual terminal. Firstly, fuzzy logic was applied to decide the moment of triggering handoff. Secondly, a method combining AHP and SAW (simple additive weight) was used to choose the best composition manner of virtual terminal. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the number of handoffs and the ratio of unnecessary handoffs. Additionally, it reflects application requirements and user preferences clearly.

Key words: heterogeneous networks; cooperation of multi-terminal; virtual terminal; vertical handoff decision; fuzzy logic

1 引言

B3G/4G 网络是由各种不同接入技术融合而成的异构网络, 这些异构网络附着在 IP 核心网上, 它的目标是随时随地为用户提供满足应用需求的通信服务。与接入技术的发展相对应, 出现了具有不同功能的终端以满足人们丰富多样的需求。虽然如今配备有多个网络接口的终端可以实现异构网间的漫游, 但对于需要大量带宽的应用 (如流媒体业

务等), 单一的网络连接往往不能满足应用的需求。一种可能的解决方案是利用多个终端建立多个网络连接并行传输数据, 为应用提供更大的带宽, 这就是多终端协同。如图 1 所示, 3 个终端分别建立 3 个网络连接, 终端 1 和终端 3 通过个域网技术 (如 IEEE 802.15) 将数据传送给运行着流媒体应用的终端 2。协同的多个终端可以组成一个虚拟终端^[1], 此终端对于外部网络和应用呈现统一的能力, 就好像一个功能强大的单个终端。

收稿日期: 2013-08-04; 修回日期: 2014-01-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2014AA01A701, 2014AA01A707); 国家自然科学基金资助项目 (61372092); 新一代宽带无线移动通信网国家科技重大专项基金资助项目 (2013ZX03002010-003)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA01A701, 2014AA01A707); The National Natural Science Foundation of China (61372092); National Science and Technology Major Project: A New Generation of Broadband Wireless Mobile Communication Networks (2013ZX03002010-003)

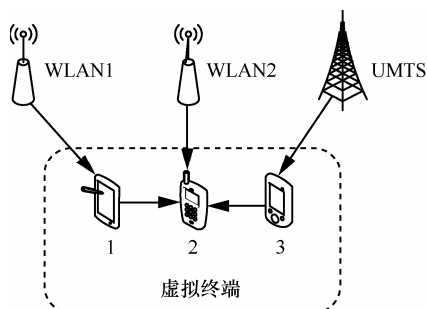


图 1 多终端协同示意

B3G/4G 网络的网络结构呈现出多层的特性。覆盖范围较大、带宽较小的蜂窝网络和覆盖范围较小、带宽较大的 WLAN 相互补充, 为用户提供多样化的 QoS 保证。携带单终端的用户在异构网中漫游时面临垂直切换决策问题, 即在网络状况发生变化时决定是否有必要切换及切换的目标网络。从蜂窝网到 WLAN 的切换被称为向下切换, 相应地, 从 WLAN 到蜂窝网的切换被称为向上切换^[2]。一方面, 垂直切换相比于水平切换有较大的延迟和性能下降, 如果用户在 WLAN 内逗留时间过短, 那么连接到 WLAN 的性能提升不足以弥补因切换而造成的性能下降^[2]。因此, 用户在 WLAN 内的逗留时间决定了是否有必要切换。另一方面, 应用需求、用户偏好和 WLAN 负载等因素可能阻止用户切换到 WLAN。切换目标网络的选择可归结为多属性决策 (MADM, multi-attribute decision making) 问题, 它在众多网络中选择出满足应用需求和用户偏好的最优网络。综上所述, 单终端的垂直切换决策可分为 2 个阶段: 切换时机的判断和切换目标网络的选择。当用户在 WLAN 内时周期性判断何时有必要进行向下切换或向上切换; 当有必要切换时, 选择切换的目标网络。如果目标网络与当前连接网络不同, 则启动垂直切换; 否则用户仍然连接当前网络。

与单终端通信场景类似, 异构网中多终端协同的垂直切换决策也可分为 2 个阶段: 切换时机的判断和虚拟终端的构建。切换时机的判断与单终端场景的含义相同, 而虚拟终端的构建比单终端场景中切换目标网络的选择更加复杂。多终端协同涉及到终端与网络的组合问题, 终端与网络的所有组合方式相当于单终端场景中的所有候选网络, 虚拟终端的构建即在那些组合方式中选择最能满足应用需求和用户偏好的组合方式构成虚拟终端。

目前, 绝大多数的异构网中的垂直切换决策算法只针对单终端多网络场景, 这些算法可分为 3 类:

- 1) 只考虑切换时机的判断;
- 2) 只考虑目标网络的选择;
- 3) 同时考虑切换时机的判断和目标网络的选择。

第 1 类算法只考虑 2 种网络: 蜂窝网和 WLAN。这类算法认为 WLAN 优于蜂窝网, 当静止的用户可同时接入这 2 种网络时, 用户会选择接入 WLAN, 而不考虑网络参数、终端参数、应用需求和用户偏好等影响网络选择的因素。这类算法关注的是根据用户的移动决定何时触发向下切换或向上切换。Zhang 等^[2]提出一种利用用户位置信息进行动态规划的垂直切换决策算法。文献[3]结合传统的基于迟滞和基于驻留时间的垂直切换算法, 提出了自适应的垂直切换算法 (SAVA, self-adaptive VHO algorithm)。该类算法单纯认为 WLAN 优于蜂窝网, 没有考虑影响垂直切换决策的其他因素, 如用户偏好、网络负载等。

第 2 类算法没有考虑用户的移动规律, 它们关注根据影响网络选择的指标从众多候选网络中选择最优网络。这类算法大多数采用多属性决策方法, 如简单加权求和、TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)、层次分析法、灰色关联分析 (GRA, grey relational analysis) 等。Bari 等^[4]首先利用非补偿性 MADM 算法去除不符合要求的候选网络, 然后应用补偿性 MADM 算法——TOPSIS 法从剩余的候选网络中选择最优网络。Song 等^[5]提出一种应用层次分析法和灰色关联分析选择最优网络的方法。

除了采用 MADM 方法之外, 研究者也提出了采用人工智能方法、博弈论等的网络选择算法。文献[6]应用基于自适应网络的模糊推理系统 (ANFIS, adaptive-network-based fuzzy inference system) 选择最优网络。Alkhawani 等^[7]提出一种结合模糊逻辑和遗传算法的最优网络选择算法。Niyato 等^[8]提出一种应用进化博弈论选择最优网络的方法。该类方法的局限性在于只考虑静态情况下最优网络的选择, 而没有考虑是否有必要切换和何时启动切换。如果只采用这类算法作为垂直切换决策算法, 可能造成连续的垂直切换而降低服务质量。

第 3 类算法同时考虑切换时机的判断和目标网络的选择, 一定程度上弥补了前 2 类算法的不足。Wang 等^[9]提出了基于策略的垂直切换决策算法, 此算法允许用户给出选择最优网络的策略并定义了“稳定期”, 只有当其他网络连续优于当前使用网络的时间超过稳定期, 才启动垂直切换。

Stevens-Navarro 等^[10]提出了一种基于 Markov 决策过程的垂直切换决策算法。此算法对于每个连接构造 QoS 回报函数,对于垂直切换带来的信令开销和处理开销构造代价函数,最后求解此 Markov 决策过程以获得每个连接的最大期望总回报。

虽然第3类方法同时考虑切换时机的判断和目标网络的选择,但是它们没有明确区分这2个问题,并且只考虑了向下切换或向上切换单方面的切换时机的判断。本文所提算法在蜂窝网和 WLAN 联合覆盖场景下的多终端协同问题中明确区分了这2类问题,首先以用户与接入点的距离、用户速度方向相对于接入点的夹角和用户的速度3个变量作为模糊逻辑系统的输入,并设定2个门限判断向下切换和向上切换的时机。然后应用 AHP 确定各指标的权值,并用 SAW 求出每种终端和网络的组合方式的效用值,效用值最大的组合方式即作为虚拟终端的构成。

2 虚拟终端的结构

在多终端协同场景中,多个终端可以同时连接到多个网络并行传输数据,它们可组成一个虚拟终端,此虚拟终端可为应用提供更强的接入能力和更大的带宽,向应用呈现统一的能力。文献[1]最早提出虚拟终端的概念,文中提出的个人虚拟网络服务(personal virtual network service)可管理、协调和配置用户的所有终端以建立个人虚拟网络(personal virtual network)即虚拟终端。Wang 等^[11]提出一种可扩展的虚拟终端的框架——统一服务终端(UST, universal service terminal)。UST 将终端的接入能力、计算能力等能力抽象为能力服务器,执行环境将应用指定的任务分配到各个能力服务器。能力分散的终端被聚合成一个功能强大的虚拟终端,使应用感受不到执行硬件的差异。

图2是提出的虚拟终端的结构示意,图中的虚拟终端由3个终端组成,对外有3个网络接口。终端2为主控终端,它管理整个虚拟终端。主控终端包含5个功能实体,分别是网络信息收集器、终端管理器、应用管理器、用户偏好管理器和状态检测器。网络信息收集器负责收集信号强度、可用带宽、时延、抖动、网络负载、费用等网络参数(第4节会详细说明);终端管理器负责收集组成终端的硬件参数,如支持的网络类型、剩余电量、功率消耗等;应用管理器负责收集运行于各个终端上的应用

对 QoS 的要求,如最低带宽、时延、抖动等;用户偏好管理器负责收集用户对费用、能量消耗、安全性等的偏好及用户偏爱的网络和终端等;状态检测器负责检测虚拟终端中各终端和其连接的网络的状态变化、应用对 QoS 要求的变化和用户偏好的变化。

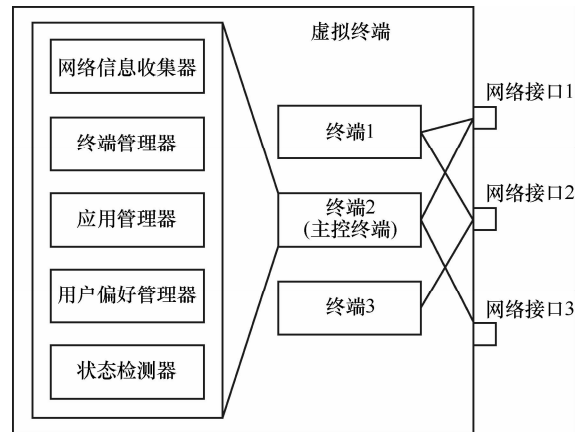


图2 虚拟终端的结构

所提的垂直切换决策算法基于终端控制与网络辅助结合的控制方式^[12],即切换时机的判断和虚拟终端的构建都是在终端侧完成,网络侧为这2个方面提供必要的信息。图2中的网络信息收集器收集相关信息,如 WLAN 接入点位置、各个网络的可用带宽、时延、抖动、费用、负载等,用于判断切换时机和构建虚拟终端。此外,网络信息收集器、终端管理器、应用管理器和用户偏好管理器也收集本地信息用于虚拟终端的构建。

除了用户的移动触发的垂直切换之外,静止的用户也可能由于用户偏好、应用需求、终端可用性、网络负载等的改变涉及到垂直切换。图2中的状态检测器检测静态条件下影响虚拟终端构成的各种因素,当这些因素发生变化时,也可触发垂直切换。

3 异构网中多终端协同的垂直切换决策算法

3.1 切换时机的判断

切换时机的判断仅仅根据用户的移动判断终端切换到 WLAN 或蜂窝网的必要性,实际中是否执行切换还与其他因素有关,比如应用需求、用户偏好、WLAN 的负载等。为叙述方便,本节假设终端有必要执行切换,那它一定切换到相应网络,而不考虑其他因素。

切换时机的判断与用户使用的终端个数无关,

仅与用户的移动趋势有关。当用户尚未连接到 WLAN 时，如果用户在短时间内不会离开 WLAN，那么可以启动向下切换使用户连接到 WLAN。当用户已经连接到 WLAN 时，如果用户即将离开 WLAN，那么应该启动向上切换以防止掉话。由此，提出一种基于模糊逻辑的切换时机的判决算法，此模糊逻辑系统有 3 个输入变量，分别是用户与接入点的距离、用户速度方向相对于接入点的夹角和用户的速度。模糊逻辑系统的输出代表向下切换的适宜度（0 到 1 之间），称之为切换值。切换值越大，表明向下切换的适宜度越高，相应地向上切换的适宜度越低；切换值越小，表明向下切换的适宜度越低，相应地向上切换的适宜度越高。为切换值设定 2 个门限：向下门限 Th_d 和向上门限 Th_u ，判断切换时机的流程如图 3 所示。 Th_d 和 Th_u 对算法的性能影响很大，后面的仿真分析部分通过仿真选择合适的门限值。

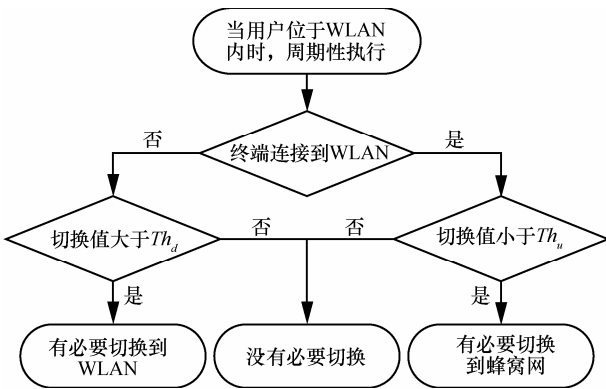


图 3 在 WLAN 内判断切换时机的流程

为简单起见，假设 WLAN 的覆盖范围是一个圆形区域，其半径为 100 m，如图 4 所示。将此区域用边长为 10 m 的正方形分割，分割的作用是降低定位误差对算法性能的影响。当用户位于某一方格内时，用此方格的中心表示用户的位置。当用户进入 WLAN 覆盖区域后，用户的终端每隔 ΔT 时间确定用户的位置，并由这些位置计算 FLS 的 3 个输入变量： $|\overline{LO}|$ 、 θ 和 v ，其中， $|\overline{LO}|$ 为用户与接入点之间的距离， θ 为用户速度方向与 $|\overline{LO}|$ 的夹角， v 为用户的速度，如图 4 所示。 L_{i-1} 表示用户前一刻的位置， L_i 表示用户现在的位置，用户当前时刻的速度 v_i 由前一时间间隔的平均速度表示。 v_i 由式 (1) 计算得出。此外，规定当 $v=0$ 时， $\theta=0$ 。

$$v_i = \frac{|\overline{OL}_i - \overline{OL}_{i-1}|}{\Delta T} \quad (1)$$

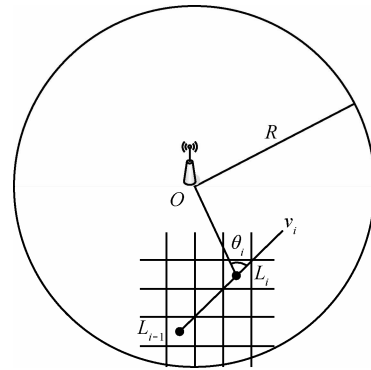
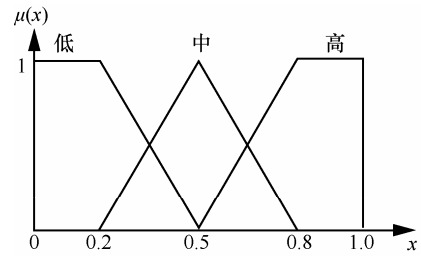
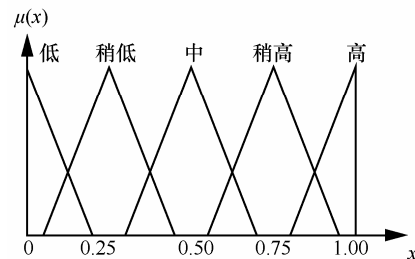


图 4 WLAN 的覆盖区域示意

$|\overline{LO}|$ 、 θ 和 v 3 个输入变量分别包含 3 个模糊集合：“低”、“中”和“高”（不同的变量有不同的表述），切换值包含 5 个模糊集合：“低”、“稍低”、“中”、“稍高”和“高”。3 个输入变量的模糊集合有相同的归一化的隶属度函数 $\mu(x)$ ，如图 5(a) 所示。图 5(b) 是输出变量切换值的 5 个模糊集合的隶属度函数。



(a) $|\overline{LO}|$ 、 θ 和 v 的模糊集合的隶属度函数



(b) 切换值的模糊集合的隶属度函数

图 5 FLS 输入变量和输出变量的模糊集合的隶属度函数

FLS 的 3 个输入变量分别有 3 个模糊集合，因此 FLS 的规则库中包含 $3^3=27$ 个规则，表 1 给出了部分规则。根据 $|\overline{LO}|$ 、 θ 和 v 3 个参数预测用户停留在 WLAN 内的时间，如果用户在 WLAN 内的停留时间较长，那么终端的切换值较高；如果用户即将离开 WLAN，那么终端的切换值较低。表 1 中的规则 1 表明用户正处于 WLAN 的中心区域并且速度较低，用户很可能在 WLAN 停留较长时间，因此规则 1 的切换值为“高”；规则 27 表明用户在

WLAN 的外部区域向边界高速移动，用户即将离开 WLAN，因此规则 27 的切换值为“低”，即用户向上切换的适宜度高。这里规则的制定实际上是依据用户之前的移动数据简单预测用户下一步的位置，即认为用户会按照当前的速度和方向继续移动，以此来决定是否触发切换。

表 1 判断切换时机的 FLS 的部分规则

序号	距离 $ \overline{LO} $	角度 θ	速度 v	切换值
1	短	小	低	高
2	短	小	中	高
3	短	小	高	高
4	短	中	低	高
5	短	中	中	高
6	短	中	高	稍高
7	短	大	低	高
...
13	中	中	低	稍高
14	中	中	中	中
15	中	中	高	中
16	中	大	低	中
17	中	大	中	稍低
...
27	长	大	高	低

3.2 虚拟终端的构建

与单终端多网络场景下的网络选择相似，多终端场景下的虚拟终端的构建问题同样属于多属性决策问题，只是选择的对象变为终端与网络的组合方式。假设用户有 2 个终端，终端 1 能连接到 UMTS 和 WLAN，而终端 2 只能连接到 WLAN。如果 2 个终端都处于 UMTS 与 WLAN 的重叠覆盖区域，那么一共有 5 种连接方式：1) 终端 1 连接到 UMTS；2) 终端 1 连接到 WLAN；3) 终端 2 连接到 WLAN；4) 终端 1 连接到 UMTS 并且终端 2 连接到 WLAN；5) 终端 1 连接到 WLAN 并且终端 2 连接到 WLAN（由于本文讨论的是多终端协同，因此不考虑单个终端连接多个网络的情况）。如果用户携带有更多终端或有更多异构网络，那么终端与网络的组合方式将会更多。

虚拟终端的构建算法首先根据用户的可用终端和可连接的网络计算出所有可能的组合方式，每一种组合方式具有带宽、时延、费用、功率等属性，然后根据应用需求和用户偏好采用 AHP 和 SAW 结合的方法选择最适宜组成虚拟终端的组合方式。

AHP 用于计算各属性的权值，SAW 用于计算各组合方式的效用值，效用值最大的组合方式即作为虚拟终端的构成。

用户对业务的感受来自 2 个方面：业务本身的体验和得到这些业务所付出的代价。业务本身的体验依赖于承载业务的网络所能提供的服务质量，具体表现为带宽、时延、抖动等 QoS 参数。为得到业务所付出的代价代表了用户的偏好。在时间地点不变的情况下，用户的代价来自 2 个方面：费用和功率。费用是用户选择网络的关键因素，而功率代表了终端的续航能力，在某些应用（如应急救援）中尤为重要。由此，选取可用带宽、费用和功率作为评价各组合方式的指标。多终端协同的主要作用是提高带宽，因此考虑流媒体应用对于可用带宽指标的要求。设定 2 种用户偏好：A 类用户偏爱费用较低的连接方式，对功率要求不高；B 类用户偏爱功率较低的连接方式，对费用要求不高。对于 A、B 这 2 种用户偏好，分别构造如式(2)、式(3)的判断矩阵，其中 3 个指标依次是可用带宽、费用和功率。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

经一致性检验，2 个判断矩阵都具有良好的一致性。它们最大的特征值对应的特征向量分别为 $[0.700\ 1, 0.700\ 1, 0.140\ 0]^T$ 和 $[0.700\ 1, 0.140\ 0, 0.700\ 1]^T$ 。分别将它们归一化后得到 A、B 这 2 类用户对可用带宽、费用和功率的权重向量 $W_A=[0.454\ 5, 0.454\ 5, 0.091\ 0]^T$ 和 $W_B=[0.454\ 5, 0.091\ 0, 0.454\ 5]^T$ 。

以图 1 中的组合方式为例说明其可用带宽、费用和功率的计算方法，表 2 列出了图 1 中各终端和网络的参数。图 1 中的组合方式的可用带宽、费用和功率分别由式(4)、式(5)和式(6)计算得出。其中式(5)的分子为单位时间内 3 个网络的总费用，分母为单位时间内的总数据量，总费用除以总数据量即为这种组合方式的平均费用。

$$B_{\text{overall}} = (B_{w_1} + B_{w_2} + B_U) \text{Mbit/s} \quad (4)$$

$$C_{\text{overall}} = \frac{C_{w_1}B_{w_1} + C_{w_2}B_{w_2} + C_U B_U}{B_{w_1} + B_{w_2} + B_U} \text{元/Mbit} \quad (5)$$

$$P_{\text{overall}} = (P_{1-w_1} + P_{2-w_2} + P_{3-U} + P_1 + P_2 + P_3) W \quad (6)$$

表 2 图 1 中各终端与网络的参数

网络	带宽 (Mbit·s ⁻¹)	费用 (元·Mbit ⁻¹)	功率/W		
			终端 1	终端 2	终端 3
WLAN1	B_{W1}	C_{W1}	P_{1-W1}	—	—
WLAN2	B_{W2}	C_{W2}	—	P_{2-W2}	—
UMTS	B_U	C_U	—	—	P_{3-U}
IEEE 802.15	—	—	P_1	P_2	P_3

由以上方法得到的各组合方式的参数还要经过规范化处理。对于可用带宽，采用如式(7)所示的规范化步骤，而对于费用和功率，规范化过程如式(8)所示。式(7)和式(8)中的 N 表示组合方式的总数，式(8)中的 X 表示费用或功率。由于流媒体应用使用的带宽有上限，当可用带宽超过此上限时，多余的带宽会被浪费。因此，设定带宽上限为 B_0 ，当组合的带宽大于 B_0 时，规范化后的带宽为 1，否则，按照式(7)中的第二部分处理。

$$B'_i = \begin{cases} 1, & B_i > B_0 \\ \frac{B_i - \min_i B_i}{B_0 - \min_i B_i}, & \text{其他} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$X'_i = \frac{\max_i X_i - X_i}{\max_i X_i - \min_i X_i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

各个组合方式的效用值由式(9)计算得出，其中， $W=[w_1, w_2, w_3]^T$ 为之前由 AHP 得出的权值向量。对于 A 类用户， $W_A=[0.454 \ 5, 0.454 \ 5, 0.091 \ 0]^T$ ，对于 B 类用户， $W_B=[0.454 \ 5, 0.091 \ 0, 0.454 \ 5]^T$ 。效用值最大的组合方式即为最符合应用需求和用户偏好的组合方式。

$$U_i = w_1 B'_i + w_2 C'_i + w_3 P'_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

4 算法的实施

如前所述，提出的异构网下多终端协同的垂直切换决策算法基于终端控制与网络辅助相结合的控制方式。终端控制体现在切换时机的判断和虚拟终端的构建都是在终端上完成，而网络辅助体现在网络侧向终端提供必要的信息以帮助其决策，这些信息的提供通过 IEEE 802.21 标准^[13]实现。

IEEE 802.21 media independent handover(MIH) Working Group 为异构网间的切换和互操作制定了一系列标准。IEEE 802.21 标准中的 MIH 功能提供 3 种服务：媒体独立事件服务 (MIES, media inde-

pendent event service)、媒体独立命令服务 (MICS, media independent command service) 和媒体独立信息服务 (MIIS, media independent information service)。MIES 提供对链路层状态变化的事件分类、事件过滤和事件报告功能，MICS 提供 MIH 用户控制切换的一系列命令，MIIS 提供做出有效切换决策的必要信息^[10]。终端可以通过当前连接的任何网络获取由 MIIS 提供的关于本网络和其他网络的信息。

MIIS 定义了一系列信息元素 (IE, information element) 来表示切换决策所需的各种信息。这些事件元素可以分为 3 类^[10]，如表 3 所示。

表 3 MIIS 定义的 3 类信息元素

信息元素类型	内容描述
第 1 类信息元素	描述一定区域内各类异构网络的总体特性，如可用的网络和运营商、漫游协议、费用、安全性等
第 2 类信息元素	描述各基站和各接入点的特性，如各基站和接入点的位置、QoS 参数 (带宽、时延、抖动等)、支持的业务等
第 3 类信息元素	描述服务提供商的特定信息

判断切换时机的算法需要比较精确地确定用户的位置和接入点的位置。构建虚拟终端的算法需要的信息包括各个异构网络的可用带宽、费用，终端对于这些网络的功率和用户偏好 (A 类用户或 B 类用户)。这些信息的获取方式如表 4 所示。

表 4 算法所需信息的获取方式

信息类型	获取实体	信息来源
用户位置	GPS、位置传感器	本地终端
接入点位置	网络信息收集器	MIIS 第 2 类信息元素
可用带宽	网络信息收集器	MIIS 第 2 类信息元素
费用	网络信息收集器	MIIS 第 1 类信息元素
功率	终端管理器	本地终端
用户偏好	用户偏好管理器	本地终端

整个算法的流程如图 6 所示。为方便描述，将判断切换时机的算法称为算法 I，而将构建虚拟终端的算法称为算法 II。从图 6 中可以看出，即使算法 I 的输出是“有必要切换”，最终终端有可能不执行切换。图 6 中“检测 4 种影响虚拟终端构成的因素”即检测网络、终端、应用和用户 4 种影响虚拟终端构成的因素的状态变化，它由状态检测器完成。当它们的状态变化达到一定程度时，也会触发虚拟终端的重构过程，表 5 描述了这 4 种状态变化的含义。对于网络状态，网络的 QoS 参数发生较大

改变指 QoS 参数已无法满足正在运行的应用的需求；对于应用状态，应用类型改变指用户启动了需求更高的应用类型，比如浏览网页的用户启动了流媒体业务；对于用户状态，用户由 A 类用户变为 B 类用户即是用户偏好发生改变。

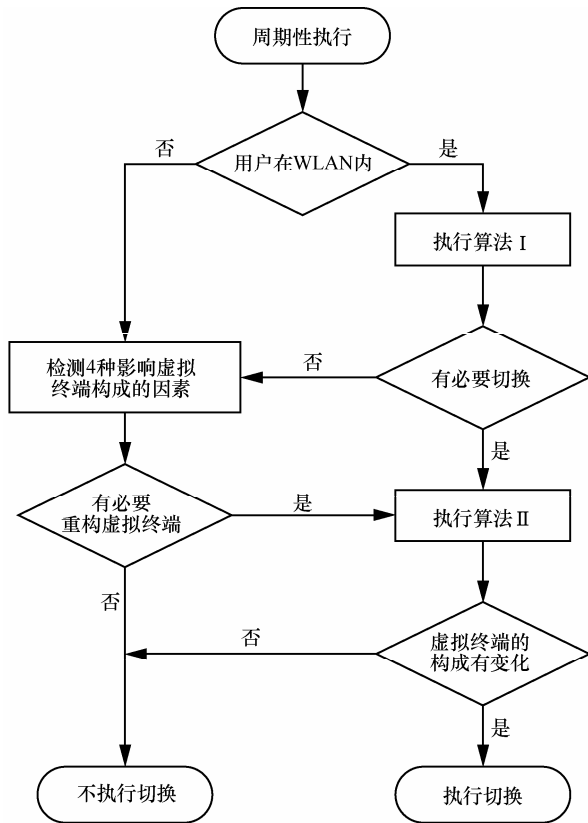


图 6 异构网下多终端协同的垂直切换决策算法流程

表 5 状态检测器检测的 4 种状态

状态类型	内容描述
网络状态	网络的 QoS 参数发生较大改变
终端状态	正在使用的终端不可用
	新的终端加入
	正在使用的终端电量较低
应用状态	应用类型改变
用户状态	用户偏好改变

5 仿真分析

5.1 场景描述

本节在 PC 的 MATLAB 仿真平台上验证所提算法的性能，计算机 CPU 为 Intel Pentium Dual T3400 2.16 GHz，内存为 2 GB，操作系统为 Windows 7 操作系统。仿真场景如图 7 所示，在边长为 2 km 的正方形区域中分布有 5 个 WLAN 网络，它们的覆盖

区域都为圆形，半径都为 100 m，UMTS 网络完全覆盖此正方形区域。200 个用户在此区域内移动，每个用户选择 3 个 WLAN 接入点作为经常活动的区域。为符合用户真实的移动规律，采用 SLAW 移动模型^[14]模拟用户的移动轨迹。假设所有用户都携带同样的 3 种终端，其中终端 1 能够连接 WLAN 和 UMTS，终端 2 只能连接到 WLAN，而终端 3 只能连接到 UMTS，表 6 列出了这些网络和终端的参数。

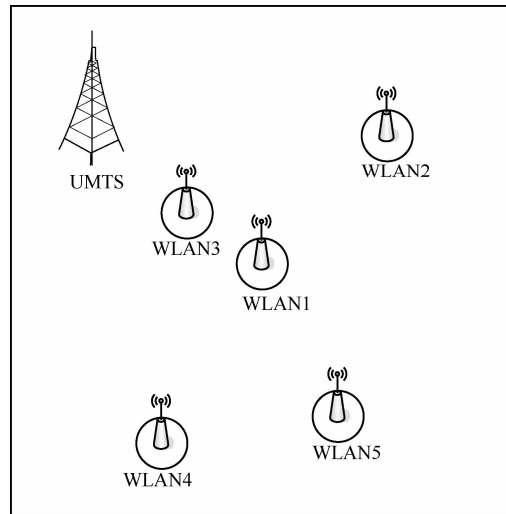


图 7 仿真场景示意

表 6 仿真场景中各网络和终端的参数

网络	带宽 /(Mbit·s ⁻¹)	费用 /(元·Mbit ⁻¹)	功率/W		
			终端 1	终端 2	终端 3
WLAN1	0.85	0.010 0	4.00	3.50	—
WLAN2	0.75	0	4.00	3.50	—
WLAN3	0.70	0.002 5	4.00	3.50	—
WLAN4	0.65	0.007 5	4.00	3.50	—
WLAN5	0.68	0.009 0	4.00	3.50	—
UMTS	0.32	0.040 0	1.00	—	0.75
IEEE 802.15	—	—	10 ⁻³	10 ⁻³	1.25×10 ⁻³

5.2 性能分析

算法的性能分析包括 3 个方面：1) 单独检验不同参数设置下算法 I 的性能，以便选择合适的参数与其他算法对比；2) 基于 5.1 节选择的参数，以基于迟滞的垂直切换决策算法^[3]作对比说明算法 I 的性能；3) 从符合应用需求和用户偏好的角度检验算法 II 的性能。

5.2.1 算法 I 的性能分析

本节假设当算法 I 的输出为“有必要切换”时，终端就一定会执行向下切换或向上切换，而不考虑

应用需求、用户偏好、WLAN 负载等因素的影响。

从以下 4 个方面比较不同向下门限和向上门限组合的性能。

1) 切换次数: 用户在移动过程中所经历的向下切换次数和向上切换次数之和。

2) WLAN 的利用率: 用户连接到 WLAN 的时间与用户处于 WLAN 内的时间之比。

3) 掉话率: 掉话次数与向上切换次数之比(掉话只可能发生在向上切换)。

4) 不必要切换率: 不必要的切换与总切换次数之比。不必要的切换包括 2 种, 图 8 左边描述了不必要的向下切换, 当终端连续进行了向下切换和向上切换, 或者隔 ΔT (算法 I 执行的周期) 时间进行了向下切换和向上切换时, 认为终端连接到 WLAN 所获得的性能提升不足以弥补因切换而造成的性能下降, 所以这 2 次向下切换是不必要的切换。图 8 右边描述了不必要的向上切换, 用户在进行向上切换之后隔一段时间再进行向下切换, 但在这段时间内用户始终处于 WLAN 内, 用户没有必要切换到 UMTS。所以这种向上切换也是不必要的切换。

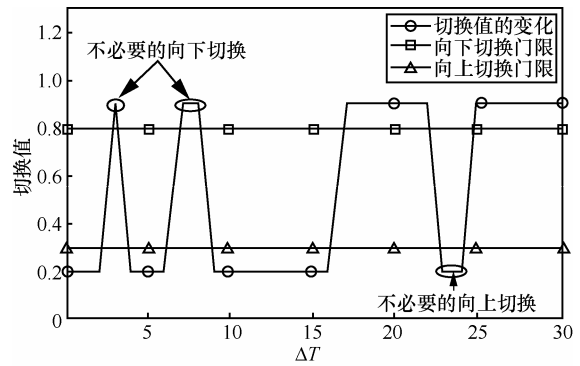


图 8 2 种不必要的切换

图 9 给出了所有用户的 4 种指标的平均值随门限值的变化曲线, 算法 I 执行的周期 $\Delta T=5$ s。图 9(a) 描述了所有用户的平均切换次数随 Th_d 和 Th_u 的变化曲线。由图可知, Th_d 越大, Th_u 越小, 切换次数越少。这是因为当切换值的变化一定时, Th_d 越大, Th_u 越小, 切换值大于 Th_d 或小于 Th_u 的次数减小, 更难以触发切换, 因此切换次数减少。

图 9(b)描述了所有用户的平均 WLAN 利用率随 Th_d 和 Th_u 的变化曲线。由图可知, Th_d 越小, Th_u 越小, WLAN 利用率越大。当 Th_d 越小, Th_u 越小时, 切换值更容易大于 Th_d 而更难小于 Th_u , 终端连接到

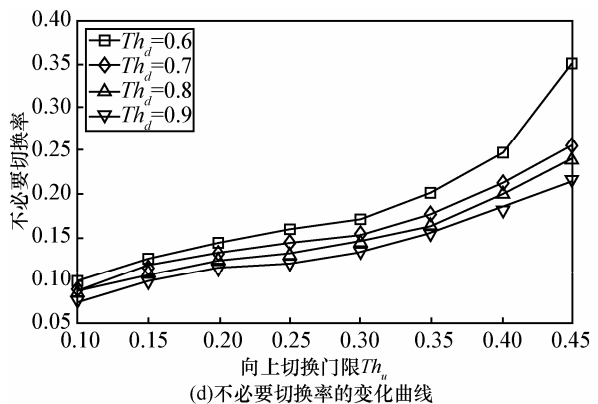
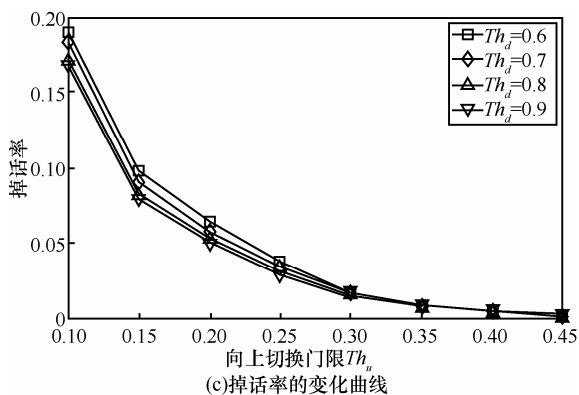
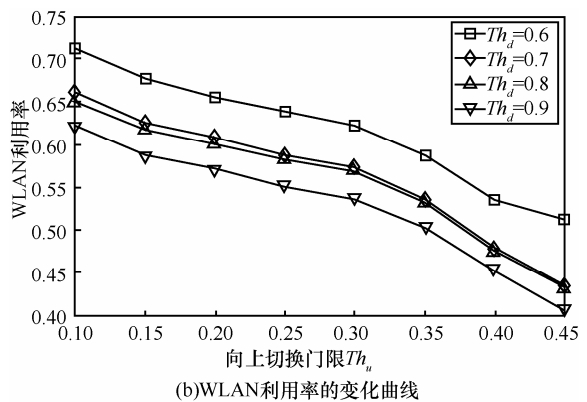
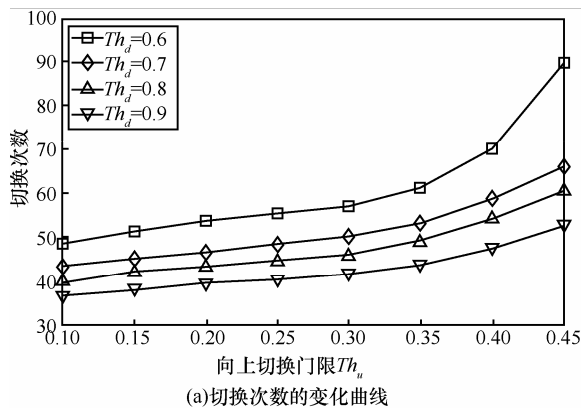


图 9 算法 I 4 种指标随门限值的变化曲线

WLAN 上的时间更长，因此 WLAN 利用率越高。

图 9(c)描述了所有用户的平均掉话率随 Th_d 和 Th_u 的变化曲线。设定垂直切换持续时间是 2 s，如果用户在启动切换后 2 s 内仍位于 WLAN 内，则不发生掉话；否则会发生掉话。由图可知，掉话率主要受 Th_u 的影响，并且 Th_u 越小，掉话率越高。这里的掉话包括 2 种情况，第一种情况如图 10 左边所示。第 6 时刻的切换值大于 Th_u ，因此不触发向上切换。第 7 时刻切换值为 0 表明用户已经离开 WLAN，所以一定发生了掉话。第二种情况如图 10 右边所示，切换值在第 22 时刻小于 Th_u ，触发了向下切换，但不能保证在用户离开 WLAN 前完成切换，因此这种情况下有可能发生掉话。 Th_u 越小，切换值在降低到 0（表明用户离开 WLAN）之前小于 Th_u 的可能性越小，因此掉话率越高。

图 9(d)描述了所有用户平均的不必要切换率随 Th_d 和 Th_u 的变化曲线。由图可知， Th_d 越大， Th_u 越小，不必要切换率越低。这种现象的原因和切换次数的变化原因相似， Th_d 越大， Th_u 越小，算法 I 的敏感度越低，越不容易触发不必要的切换。

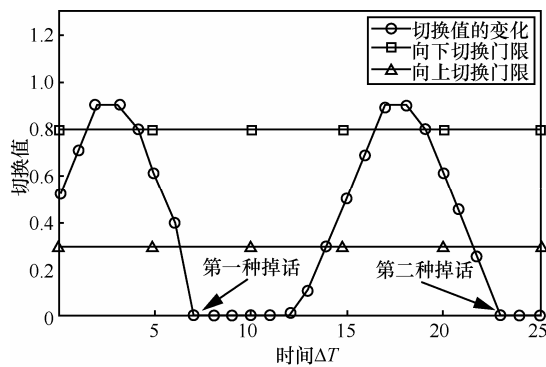


图 10 掉话的 2 种情况

一个好的切换决策算法应该具有切换次数少、WLAN 利用率高、掉话率低和不必要切换率低的特点。但是从图 9 可以看出，这几个要求是无法同时满足的，只能通过选取合适的门限值在 4 个指标之间进行折中。将对用户影响较大的掉话率和切换次数作为主要的考虑指标，同时兼顾 WLAN 利用率和不必要切换率，建议将 Th_d 设定为 0.9，将 Th_u 设定为 0.3。此时，切换次数、WLAN 利用率、掉话率和不必要切换率的平均值分别为 41.245 0、0.540 2、0.014 7、0.130 5，分别将上述值记为 N_f 、 U_f 、 C_f 和 H_f 。

5.2.2 算法 I 与基于迟滞的算法的性能比较

以基于迟滞的垂直切换决策算法^[3]作为对比分

析算法 I 的性能。基于迟滞的算法定义了接收信号强度门限 RSS_0 和迟滞参数 h_y ，具体过程如图 11 所示。在定义的仿真场景中，为了计算的方便，将 RSS_0 转化为用户与接入点之间的距离 d ，并应用式(10)表示的信号传播模型，式中 $L_0=40$ dB, $n=3.5$, $P_f=100$ mW。

$$10 \log \frac{P_r}{P_t} = L_0 + 10n \log d \quad (10)$$

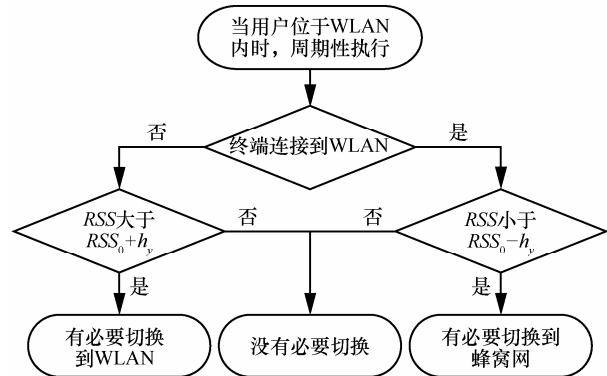


图 11 基于迟滞的垂直切换决策算法的流程

为了方便性能的比较，设定掉话率的上限 $r_{\text{calldropping}}=0.015$ ，并认为当不同算法的掉话率小于此门限时，它们在掉话率方面的性能接近。图 12(a)给基于迟滞的算法的平均切换次数曲线（切换次数主要受 h_y 影响，受 d 影响较小），图 12(b)~图 12(d)所示分别为掉话率小于 $r_{\text{calldropping}}$ 的各种 d 和 h_y 的参数组合的 WLAN 利用率、掉话率和不必要切换率（实线所示）。从图中可以看出，当 d 和 h_y 在以上参数集中取值时，平均切换次数和不必要切换率都大于 N_f 和 H_f ，而 WLAN 利用率只有当 $d=65$ m, $h_y=1$ dB 时才会超过 U_f 。但是当 $h_y=1$ dB 时，切换次数过大，因此 $d=65$ m, $h_y=1$ dB 的取值组合不可取。综上所述，在同等的掉话率约束的条件下，提出的基于模糊逻辑的垂直切换决策算法整体优于基于迟滞的算法，能够更容易地选择合适的参数在各个指标间进行折中并获得良好的性能。

5.2.3 算法 II 的性能分析

本节从符合应用需求和用户偏好的角度检验所提算法的性能。将仿真区域分为 6 部分，分别为“WLAN1 内”、“WLAN2 内”、“WLAN3 内”、“WLAN4 内”、“WLAN5 内”和“WLAN 外”，在 6 个部分分别运行算法 II。表 7 列出了 A、B 2 类用户在不同地区构建的虚拟终端的构成方式，表中的字母是虚拟终端构成方式的编号。图 13 给出了表 7 中所列的 5 种虚拟终端的构成方式，其中构成虚拟终端的终端由虚线标出。

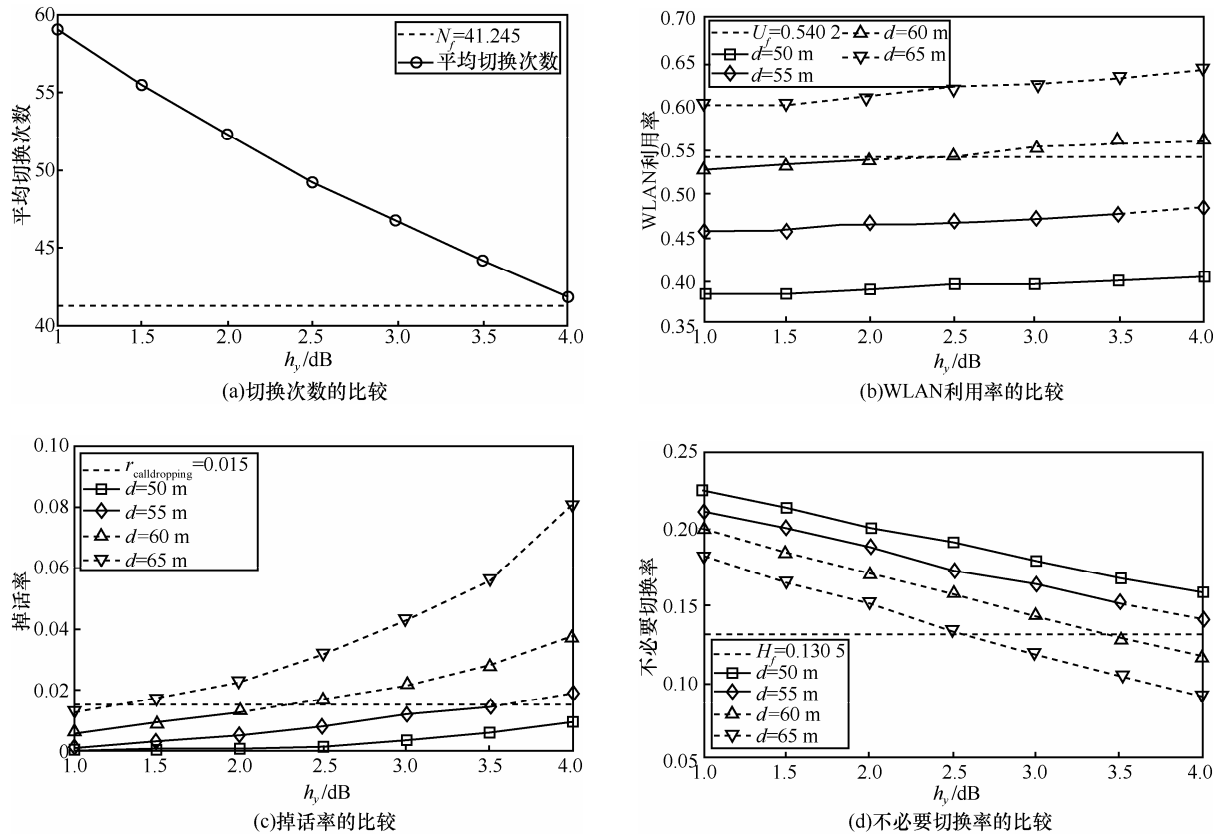


图 12 算法 1 与基于迟滞的算法的性能比较

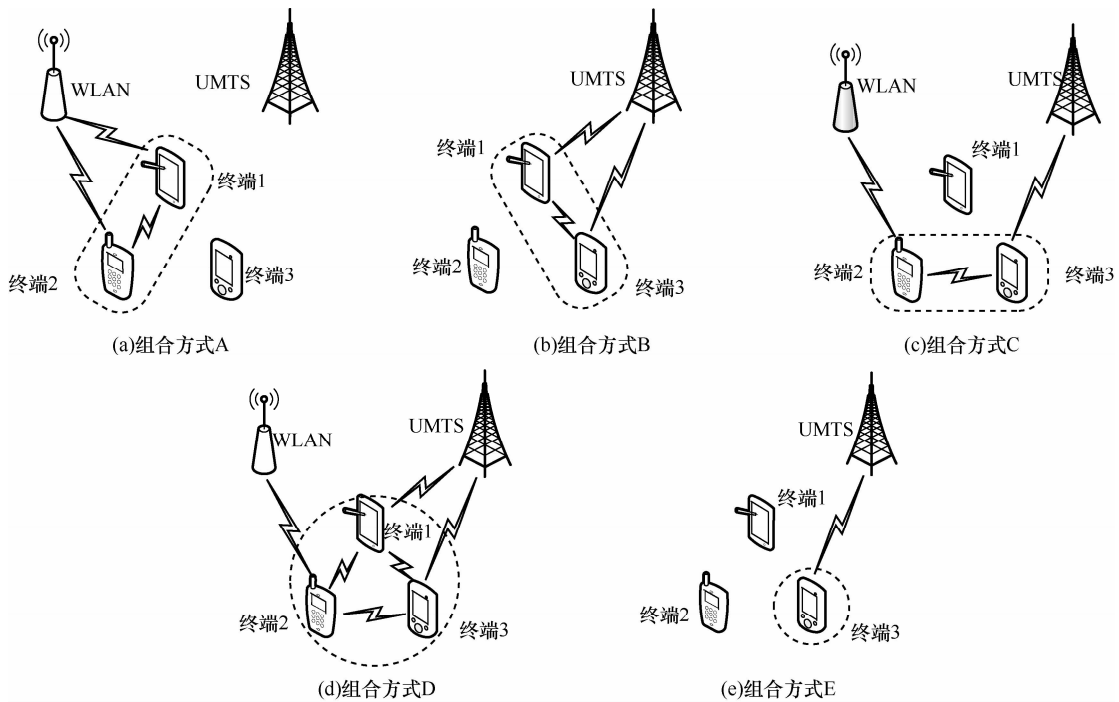


图 13 A、B2 类用户的虚拟终端构成方式

图 14 为在各个 WLAN 内和 WLAN 外 A、B 2 类用户的带宽、费用和功率的对比。可以看出，A 类用户在各区域内的费用均不大于 B 类用户的

费用，而 B 类用户在各区域内的功率均小于 A 类用户的功率。由此可见，提出的构建虚拟终端的算法能够体现用户偏好。此外，用户在 WLAN 内

的带宽均超过 1 Mbit/s, 能够满足一般流媒体应用的需求。

表 7 A、B 2 类用户在不同地区构建的虚拟终端的构成方式

网络	A 类用户	B 类用户
WLAN1	A	C
WLAN2	A	C
WLAN3	A	D
WLAN4	A	D
WLAN5	A	D
UMTS	B	E

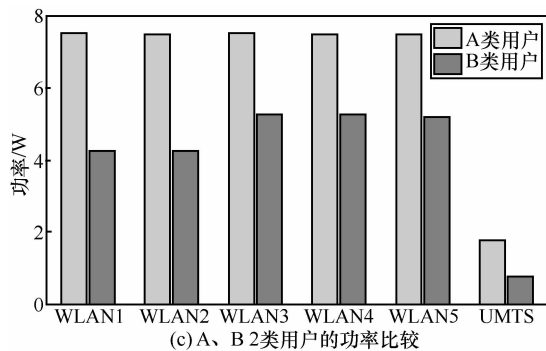
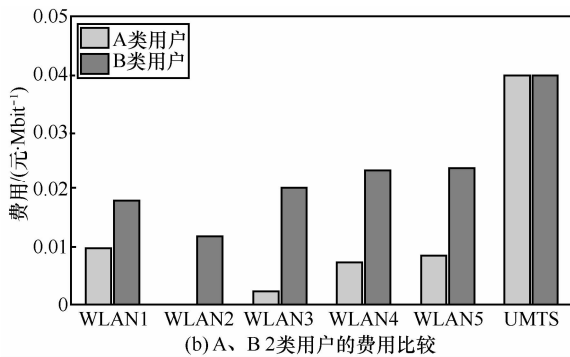
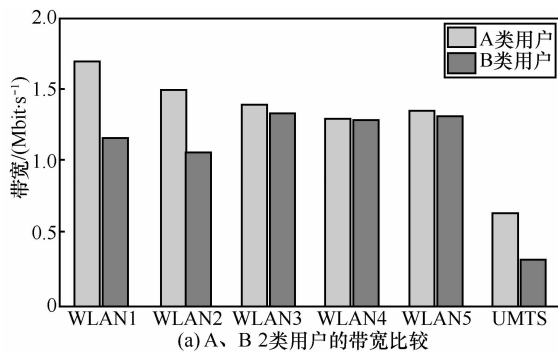


图 14 A、B 2 类用户的带宽、费用和功率比较

6 结束语

本文提出了一种异构网下多终端协同的垂直切换决策算法, 它分为 2 个部分: 切换时机的判断

和虚拟终端的构建。采用模糊逻辑判断切换的时机, 用户的移动信息被作为模糊逻辑系统的输入。AHP 和 SAW 结合的方法用于选择满足应用需求和用户偏好的虚拟终端的构成方式, AHP 用于计算带宽、费用和功率 3 个指标的权值, SAW 用于选择出最优的组合方式。对于切换时机的判断, 以基于迟滞的算法作为对比, 仿真结果表明, 在设定掉话率上限的条件下, 所提出的算法整体优于基于迟滞的算法。对于虚拟终端的构建, 考虑流媒体应用, 并设定 2 种用户偏好。仿真结果表明, AHP 与 SAW 结合的方法能够选择出满足应用需求和用户偏好的虚拟终端的构成方式。

参考文献:

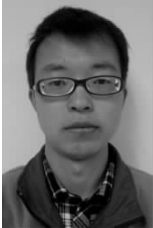
- [1] VANEM E, VAN D T, THANH D V. Multimedia communications with multiple devices using the personal virtual network service[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C].Orlando, FL, USA, 2002. 223-227.
- [2] ZHANG J, CHAN H C B, LEUNG V C M. A location-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous mobile networks[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference[C].San Francisco, CA, USA, 2006. 1-5.
- [3] LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* SAVA: a novel self-adaptive vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference[C].San Francisco, CA, USA, 2006. 1-5.
- [4] BARI F, LEUNG V C M. Automated network selection in a heterogeneous wireless network environment[J]. IEEE Network, 2007, 21(1): 34-40.
- [5] SONG Q Y, JAMALIPOUR A. Network selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(3): 42-48.
- [6] ÇALHAN A, ÇEKEN C. An adaptive neuro-fuzzy based vertical handoff decision algorithm for wireless heterogeneous networks[A]. Proceedings of IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications[C].Istanbul, Turkey, 2010. 2271-2276.
- [7] ALKHAWLANI M, AYESH A. Access network selection based on fuzzy logic and genetic algorithms[J].Advances in Artificial Intelligence, 2008, 8(1): 1-12.
- [8] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008-2017.
- [9] WANG H J, KATZ R H, GIESE J. Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks[A]. Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications[C].New Orleans, LA, USA, 1999. 51-60.
- [10] STEVENS-NAVARRO E, LIN Y, WONG V W S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1243-1254.
- [11] WANG X, JI Y, ZHANG P. Universal service terminal: evolving towards the TSE in MUSE[A]. Proceedings of World Wireless Research Forum[C].Oslo, Norway, 2004.

- [12] LEE C W, CHEN L M, CHEN M C, *et al.* A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(11): 2118-2128.
- [13] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 21: Media Independent Handover Services[S]. IEEE 802.21, 2008.
- [14] LEE K, HONG S, KIM S J, *et al.* SLAW: self-similar least-action human walk[J].IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(2): 515-529.



赵季红 (1963-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安交通大学教授、西安邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。

作者简介:



任臻晔 (1990-), 男, 甘肃庆阳人, 西安交通大学博士生, 主要研究方向为异构网络中的无线资源管理。



曲桦 (1961-), 男, 陕西杨凌人, 博士, 西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信网、计算机网络体系结构。



(上接第 66 页)

- for Web service composition[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(7): 1067-1075.
- [16] ZHENG Z B, LYU M R. Optimal fault tolerance strategy selection for Web services[J].International Journal of Web Services Research,2010, 7(4):21-40.
- [17] ZHENG Z B, LYU M R. An adaptive QoS-aware fault tolerance strategy for Web services[J]. Empirical software Engineering, 2010,15(4): 323-345.
- [18] SANTHANAM G R,BASU S,HONVAR V. Web service substitution based on preferences over non-functional attributes[A].IEEE International Conference on Services Computing[C]. Bangalore,India, 2009. 210-217.

作者简介:



王海艳 (1974-), 女, 江苏东台人, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为计算机网络、大数据应用技术、可信计算技术等。

李思瑞 (1987-), 男, 安徽阜阳人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为基于网络的计算机软件应用技术等。