

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201605125

异构无线网络接入选择算法综述

俞鹤伟¹, 梁根^{1,2}

(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510641; 2. 广东石油化工学院 理学院, 广东 茂名 525000)

摘要: 移动互联网和无线通信技术的发展形成多种无线网络共存、覆盖范围重叠的异构无线网络, 各种无线接入技术的差异和单一网络技术无法满足用户的全部需求使异构无线网络融合成为必然, 接入选择作为异构无线网络融合的关键技术之一已成为研究热点. 在简述异构无线网络基本架构和接入选择概念的基础上, 对接入选择算法进行分类总结与详细对比分析, 深入剖析各算法采用的方法和特点, 同时对存在的问题进行总结归纳, 并展望了未来的研究方向.

关键词: 异构无线网络; 接入选择; 最合适连接; 网络参数

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)11-0178-11

A survey of access selection algorithms in heterogeneous wireless networks

YU Hewei¹, LIANG Gen^{1,2}

(1. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. College of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: The development of mobile Internet and wireless communication technologies promote heterogeneous wireless networks (HWNs), in which a variety of wireless networks coexist and coverage overlap. The differences between various wireless access technologies and single network cannot meet all the requirements of users. Consequently, it is inevitable for the integration of HWNs. The access selection as one of the key technologies of HWNs has become a research hotspot. Based on analyzing the infrastructure of HWNs and the concepts of the access selection, this paper focuses on the classification and detailed comparative analysis of the access selection algorithm. Simultaneously, the existent problems are summarized, and the future research directions and challenges are presented.

Keywords: heterogeneous wireless networks; access selection; always best connected; network parameter

近年来,人们对能够随时随地以高质量接入宽带无线网络的需求日益强烈,适应不同场景的多种无线网络技术获得了迅速的发展. 移动蜂窝网络从 GSM(Global System for Mobile Communication)发展到 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System),又发展到 LTE(Long Term Evolution),提供了大范围的网络覆盖以及无缝移动性保障^[1-2];此外,一系列 802.11 无线局域网 WLAN(Wireless Local Area Network)标准和 802.16 无线城域网 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)标准的建立,为用户提供了高速率的无线连接^[3].

在 GSM 基站信号覆盖范围内,同时加入 LTE、WLAN、WiMAX 等无线接入点,以方便人们传输数据的方式成为业界的通用模式^[4-5],从而逐步形成

多种网络共同存在、信号覆盖范围重叠的异构无线网络(HWNs, Heterogeneous Wireless Networks). 与此同时,各种网络的信号覆盖范围、上下行传输速率和最适合支持的业务类型等都各不相同,任何一种网络技术无法同时很好地支持所有不同的用户业务. 随着 HWNs 的发展,在这些网络在各自的演进过程中彼此相互竞争、相互补充、相互促进,最终使 HWNs 融合成为必然^[6-7].

在 HWNs 融合过程中,各无线网络通过不同的架构和协议作为接入网络 and 用户连接,汇聚后各无线网络通过公共 IP 核心网进行互联,多模移动终端用户可以选择某一个接入点,通过公共的 IP 核心网访问 Internet^[8-9], HWNs 的网络架构如图 1 所示.

网络接入选择是 HWNs 融合的关键技术之一^[10-12],其主要功能是对用户的接入请求进行控制,并选择某一个网络为用户提供连接服务. 如何利用 HWNs 在不同接入技术、重叠网络架构、多业务流量负载等方面的特点,在为用户提供接入选择的同时,保证用户业务的 QoS(Quality of Service)、最优化无线资源利用成为 HWNs 研究中的热

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(61070179); 广东省自然科学基金项目(10151601501000015); 广东省科技计划项目(2013B010401006)

作者简介: 俞鹤伟(1967—),男,教授、博士生导师;
梁根(1979—),男,副教授、博士研究生

通信作者: 梁根, L_Gen@126.com

点^[6, 13-14].

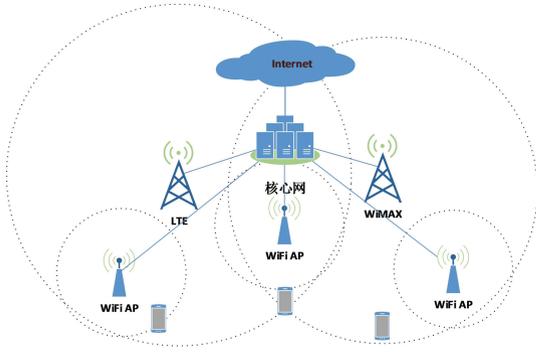


图 1 HWNs 架构

Fig.1 Architecture of HWNs

目前,有部分综述文献对 HWNs 进行了研究.例如文献[1-2]综述了异构蜂窝网络理论模型、现实制约和未来挑战,但是该文献主要研究的是 3GPP 标准下的异构蜂窝网络,没有涉及蜂窝网络和 WLAN 融合的场景.文献[4, 6]主要综述了实现异构无线网络无缝移动的互联互通机制,并制定一个考虑了不同的标准化组织互联互通框架,为 WLAN、WiMAX 和 3GPP LTE 的共存和融合提出解决方案.文献[9]对 HWNs 的网络检测和接入选择问题进行了综述,讨论了移动管理的相关方法.文献[15-16]主要综述了 HWNs 的移动管理相关技术,提出一个异构互通架构,并对支持高级的移动性管理的最新协议进行了比较分析,但是文献没有具体分析算法.文献[17]综述了 HWNs 中垂直切换的概念、切换过程、切换时机,并分析了垂直切换判断的理论模型.文献[18]综述了不同的切换类型、切换特性和切换判定度量,对基于 RSS、QoS、决策函数、网络智能和上下文的切换算法进行了分析对比.文献[19]综述了 HWNs 中垂直切换的过程和判断标准,并将垂直切换判断算法分为基于 RSS、基于带宽、基于代价函数和基于混合模型的 4 类算法,对每类算法各选取 3 篇参考文献进行了分析对比.此外,文献[20]综述了 HWNs 接入选择算法中不同的数学理论模型,同时设计了一套特定的模拟场景,分析比较了各接入选择数学模型在该场景下的不同结果.

本文综述了 HWNs 环境下的接入选择算法,主要工作包括以下三个方面:系统地对各接入选择算法进行分类,并描述各类算法的基本思想;分析各类算法的主要参考文献,并对其进行归纳对比;最后,对存在问题进行总结,并提出了进一步的研究方向.本文旨在形成较完整的研究归纳,为同类研究提供参考.

1 网络接入选择概述

在 HWNs 中,由于移动终端业务的多样性、无线网络信道传输质量的差异性、无线网络信号的重叠性等因素,因此需要依靠网络接入选择算法保障用户能够接入到最适合的网络进行业务处理^[15-16].

1.1 网络接入选择基本原理

网络接入选择算法可以分为移动终端发起初始连接的接入选择和移动终端切换到另一个网络的接入重选两类^[9].

网络接入选择的控制方式可以归纳为以下三种:终端控制接入、网络控制接入和终端辅助的网络控制接入^[15, 18].在第一种方式中,终端通过监测各网络参数并结合接入选择算法,终端自主执行接入选择;在第二种方式中,网络控制中心监测网络状态并将接入选择结果发送给发起接入请求的移动终端,控制过程由网络端完成;此外,在第三种方式中,终端将检测到的各无线网络参数值以及用户个人喜好等参数发送到网络中心的决策模块,再由网络中心根据算法对终端进行接入控制.

网络接入选择的过程可以分为三个阶段:网络发现、选网决策和接入执行^[9, 17-18].第一个阶段,移动终端需要测量其可用信号范围内各无线网络的性能参数;第二阶段,移动终端或网络根据选网算法并结合各种因素作出接入判决;第三阶段,依据第二阶段的判决结果,根据相应无线网络的通信协议步骤协助用户完成网络连接.在这三个阶段中,选网决策步骤起着至关重要的作用,它关系到满足用户的需求,协调网络资源的利用和使网络性能最好^[18].

1.2 接入选择关键问题

在以往的网络中,网络间的接入选择判断指标主要与链路质量相关,考虑的因素比较单一,其出发点在于如何维持当前的物理连接.随着无线网络的发展,未来可接入的网络越来越多,可能会出现不同网络管理域和技术之间的切换,因此,判断不能只基于某一个判决度量因素,而是需要综合多个判决度量因素全盘考虑接入合适的网络.

对于如何选择接入合适的网络,文献[17, 21]提出 ABC(Always Best Connected)概念,指的是用户终端在重叠的信号覆盖范围内选择最合适的接入方式来传输数据.其中“最合适”的含义主要是根据用户、业务和网络三个层面的各种因素,并且各个层面都有静态和动态因素,具体如表 1 所示.

目前对网络接入选择的研究大部分集中于根据各种决策因素,设计一个可靠的接入判断算法来选择最佳网络,使得既能提高用户满意度和保证业务质量,同时又能使网络运营商利益最大化.

表 1 接入判断因素

Tab.1 Judgment factors of access selection

	静态因素	动态因素
网络层面	网络特性、信号范围、服务价格、容量限制、处理能力等	信号干扰、资源使用状态、系统负载、可靠性等
业务层面	业务类型、QoS 需求、服务优先级等	带宽分配、传输时延、阻塞率、业务到达概率等
用户层面	用户喜好、终端性能、价格限制等	用户移动性、发射功率、电池容量、地理位置等

2 接入选择算法研究综述

网络接入选择算法的设计直接关系到用户体验和网络资源利用率^[22]。目前国内外学者在 HWNs 接入选择算法方面已经做了大量研究,纵观各种算法,根据判断标准本文将其划分为基于接收信号强度 (RSS, Received Signal Strength)、负载均衡和业务 QoS 的接入选择算法,根据算法所采用的数学模型本文又将其划分为基于多属性决策判决、效用函数、模糊逻辑、博弈论等的接入选择算法^[18-20]。

2.1 基于 RSS 的接入选择算法

该类算法的基本思想是移动终端测量各无线网络的 RSS 参数,选择接入到 RSS 最高的网络。此外,如果备选接入网络的 RSS 高于当前连接网络的 RSS,即 $RSS_{new} > RSS_{old}$,则切换到 RSS 最高的网络。基于 RSS 的接入选择算法复杂度低,易于实施,但性能较差,在瑞利衰落和阴影衰落的影响下,往往会引发较严重的乒乓效应,判决结果较为片面。

Hanjin, Lee 等^[23]所提出的改进方式是在最高 RSS 算法的基础上增加滞后计时 H ,只有当 $RSS_{new} > RSS_{old} + H$,移动终端才接入到新的网络,算法中增加滞后计时 H 的可以减少乒乓效应,但也因此增加了时延,而且 H 越大,时延也越大,对于如何计算合适的的滞后计时仍有待进一步研究。

Roy, Sanjay Dhar 等^[24]在上述算法的基础上提出一种基于 RSS 和信号强度比例并包含滞后计时的接入选择算法,在 WLAN 和 3G 网络中移动终端 RSS 的测量采用不同的取样间隔,并评估计算滞后延时和限制不同网络间的切换次数,比基于固定滞后计时算法有更好的性能。

Ahuja, Kiran 等^[25]基于平均 RSS,再结合移动用户距离和中断概率的提出接入选择算法,该算法包括两个阶段,在第一阶段中,对重叠区域进行距离估计,在第二阶段,根据平均 RSS 选择最佳的网络。

2.2 基于负载均衡的接入选择算法

此类算法的基本思想是将用户的接入请求分配到网络中负载最低的接入点,此外,当系统的负载达到一定程度时,可以执行垂直切换达到用户重新分布,以达到均衡负载的目的。

SHENG Jie 等^[26]根据终端移动性和各无线网

络的负载状态提出一种混合负载均衡的接入选择算法,算法将用户业务由重负载区域向轻负载区域转移,此外再结合资源预留和强占优先的策略,实现支持不同的用户业务优先级。

Gerasimenko, M 等^[27]提出一种以用户为中心的负载感知接入选择算法,强调用户的个人偏好,设计依赖网络负载信息的适当的滞后机制,最大限度地减少反馈开销,通过实验和基于 WiFi 优先的算法比较,有效提高负载均衡和网络资源利用率。

Ma, D 等^[28]的算法提出当网络供应的资源不能保证接入呼叫请求的服务质量时,系统将通过发起垂直切换执行负载均衡,以创建更多的可用资源,并且该负载均衡算法可使各个接入网的网络资源利用率变化最小。

基于负载均衡的接入选择算法通过业务的转移提高了 HWNs 的资源使用率,但是该类算法有可能无法满足用户业务的 QoS 需求,用户有可能连接到质量较差的网络中,因此,无法有效保障用户实时或非实时业务的 QoS 需求。

2.3 基于业务 QoS 的接入选择算法

此类算法的基本思想是由于各无线接入网络的性能参数存在差异,不同的网络适合支持不同的业务类型,因此,算法将用户接入到最适合保证其业务 QoS 的网络。

Abdul Hasib 等^[29]针对 CDMA2000 and IEEE 802.11 网络中如何利用不同 RAT 资源以有效实现业务的 QoS 保障,从用户和服务提供者的角度最小化服务成本出发,提出一种自适应通用无线资源管理方案,根据业务类型、用户移动性和位置、信息和服务成本等参数,通过采用马尔可夫链理论进行评估,选择最优的接入点和最大限度地减少不必要的切换,从而提供稳定的通信和业务 QoS 保障。

Chen, Huan 等^[30]为支持 HWNs 中多媒体业务的 QoS 和优化资源利用,提出一个基于信道保护的动态优化最佳接入控制机制,基于马尔可夫决策过程和敏感性分析设计基于阈值的接入控制算法,减少网络环境中流量变化时不必要的计算,并通过系统容量估计和 QoS 映射技术,对多业务 QoS 进行支持。

Miao, Jie 等^[31]以最大化系统总容量为目标,提出一种支持 QoS 的联合功率和带宽分配接入控制

算法, 算法采用凸优化理论进行分析, 同时满足时延约束和业务流量比例公平的最小速率约束, 在接入中保障业务的 QoS 和最大化无线资源利用率。

基于业务 QoS 的接入选择算法通常会将同一类接入请求连接到同一个网络中, 因此, 该类算法容易导致网络间的负载不均衡。

2.4 基于多属性决策判决的接入选择算法

多属性决策判决 (MADM, Multiple Attribute Decision Making) 接入选择算法根据用户终端对各网络性能参数的偏好制定策略。MADM 算法主要分为两步, 第一步首先根据用户对某个网络参数的偏好程度确定其对应的决策权值。此外, 由于各网络参数的标准度量单位不同, 因此, 第二步就需要对这些参数进行标准化处理, 以便将所有参数进行累加并计算各网络的选择排序结果。MADM 算法可以表示为

$$U = \sum_{n=1}^N p_{i,n} \omega_{i,n}$$

式中, $p_{i,n}$ 、 $\omega_{i,n}$ 分别表示用户 i 的第 n 个网络参数及该参数对应的权值。

MADM 算法包括许多分支, 如简单加权法 (SAW, Simple Additive Weighting)、加权乘积法 (WPM, Weighted Product Method)、灰色关联度算法 (GRA, Gray Relation Analysis)、层次分析法 (AHP, Analytic Hierarchy Process)、逼近理想值算法 (TOPSIS, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 等。

表 2 MADM 接入选择算法对比

Tab.2 Comparison of MADM based access selection algorithms

方法	目标	参数	优点	缺点	文献
AHP+SAW	根据属性矩阵和权重向量, 利用 SAW 垂直切换算法进行网络选择判决	SINR、通信代价、需求带宽、可用带宽	支持多业务, 能够根据各业务特点综合考虑各属性间关系	会受到分配的属性权重向量的影响, 且切换次数较高	[32]
CGA+MADM	利用混沌遗传算法对适应度函数求解得到网络选择评价指标权重	剩余带宽比、阻塞率、时延、RSS、逗留时间、价格	综合考虑多个网络接入评价指标	过多的网络属性增加算法的复杂度	[33]
AHP+ME	根据不同用户视频特性、带宽需求和网络状况, 为用户选择合适网络接入	视频失真度、网络可用带宽、价格、网络负载	兼顾用户公平性和网络拥塞控制, 用户接入分布更合理	通过加权求和得到网络隶属度的大小容易受到权重因素的影响	[34]
TOPSIS	根据 QoS 参数阈值评估权重并进行网络选择	带宽、时延、丢包率、价格	根据业务 QoS 参数动态调整属性权重	业务阈值的设置影响属性权重的确定	[35]
GRA+AHP	根据属性权重计算排名并进行网络选择	带宽、抖动、时延、价格	运算结果是基于原始数据并且运算简单快捷	决策因素重要性分级方法影响选择结果	[36]

MADM 算法适用于 HWNs 环境下多参数判断的接入选择, 但是, 该类算法对用户传输业务的内容不作考虑, 此外, 为了评价每个参数的重要程度, 需要由用户自行建立权重判断矩阵, 具有较大的主观性, 导致无法正确得到属性权重, 最后, 若各参数的

Liu Sheng-mei 等^[32] 利用 SINR 值、网络可用带宽、用户通信代价等因素构建属性矩阵, 各 QoS 属性的权重则由 AHP 方法的特征向量来决定, 最后根据属性矩阵和权重向量利用 SAW 方法进行接入判决。

TANG Liang-rui 等^[33] 对遗传算法进行改进, 提出一种基于混沌遗传的接入选择算法 (Chaos Genetic Algorithms, CGA), 通过混沌遗传算法的适应度函数来计算选择指标权重, 利用多属性优化解决接入选择的全局寻优问题。

WEI Shu-zhi 等^[34] 利用 AHP 和熵值法 (Entropy Method, ME) 对网络选择参数权重进行确定, 并通过 MADM 为用户视频业务接入最佳网络, 接入后带宽资源分配大小的计算则通过构建非合作博弈模型和求解用户效用函数的纳什均衡解进行确定。

Ahuja Kiran 等^[35] 针对 UMTS、WLAN、GPRS and WiMAX 四种网络环境, 设计了多目标选择函数, 提出一种使用熵技术计算网络参数权重的改进 TOPSIS 接入选择算法, 并且属性的权重系数可以根据业务进行动态调整。

Verma, Rajiv^[36] 针对同时提供高品质的服务和满足不同类型的用户服务级别协议提出一个结合 GRA 和 AHP 的多属性网络接入选择算法, 算法中采用 AHP 方法根据网络性能设定属性的相对权重, 以及采用 GRA 方法进行候选网络排名。

上述基于 MADM 的接入选择算法的对比具体如表 2 所示。

一致性检查不通过, 则需要再次耗时构造判决矩阵进行检查。

2.5 基于效用函数的接入选择算法

该类算法的主要思想是通过设计一个效用函数, 基于网络接入选择时需要考虑的各个参数例如

RSS、信号覆盖范围、网络可用带宽、终端移动速度、服务价格、发射功率等计算各候选接入网络的效用函数,并将函数值进行排序,最后接入到效用函数值最高的网络。

LI Jian-Dong 研究团队^[37-38]结合带宽资源分配和网络接入选择进行算法设计,算法通过凸优化理论求解最大化用户速率效用函数,并且算法考虑了带宽资源分配的约束条件,根据网络的可用带宽和用户业务的带宽资源需求获得最大化信息传输速率,将用户分配到最合适的网络中。另外,该团队的研究成果中也提及到结合时延控制和网络接入选择的算法,算法的目标函数为用户业务时延最小化,通过计算不同网络的传输速率和传输时延来设计并行接入算法,最后根据门限选择最小的接入网络集合获得最小时延保证。

XIE Xian-zhong 等^[39]针对接入网络发现阶段 RSS 测量不确定性、候选网络更新速度慢等问题,设计基于终端代价函数权值可变的自适应接入选择算法,对高速移动终端的网络发现阶段进行了改进,在此基础上,通过灵活改变代价函数的权值,并且加入网络和用户的属性计算,求解出代价函数值

最小的接入网络。

FAN Wen-hao 等^[40]为了更好地反映实际应用环境下终端的差异性,基于最大化网络效用提出一种综合考虑了多模终端发射功率及接入网络带宽资源分配的模型,适合终端自身配置差异与用户业务需求的不同的接入环境。

Nguyen-Vuong, Q T 等^[41]提出一个捕获终端用户喜好的分析模型,基于该模型,设计一个自动网络选择机制,该机制考虑到了连接质量、终端用户喜好、连接成本之间的折衷,从终端用户和网络运营商的角度进行计算。

El Helou, M 等^[42]通过分析无线电资源管理机制,提出混合以网络为中心和以用户为中心的方法,通过周期性地广播网络信息,协助移动用户接入选择,满足运营商的目标。在另一方面,移动用户还集成自己的需求和喜好来选择自己的接入网络,以最大限度地发挥自己的效用。与其它接入选择技术相比,混合以网络为中心和用户为中心的混合方法能有效提高资源利用率和最大限度地提高用户满意度。

上述基于效用函数的接入选择算法对比具体如表 3 所示。

表 3 基于效用函数的接入选择算法对比

Tab.3 Comparison of cost function based access selection algorithms

函数类型	目标	参数	优点	缺点	文献
用户信息传输速率函数	最大化整体网络的信息传输速率和带宽利用率为目标进行网络选择	带宽、功率、频谱效益	有较高的网络吞吐量和资源利用率	未考虑用户多业务 QoS 特点	[37-38]
多属性代价函数	基于终端代价函数权值可变的网络选择	带宽、RSS、时延、价格、能量消耗	提高候选网络集更新速度	结合模糊逻辑理论动态优化多属性权值有较高复杂性	[39]
终端能效函数	最大化终端数据传输能效的网络选择	RSS、能量消耗、吞吐量	保证终端能耗限制与吞吐量,有较好数据传输连续性	决策容易受到终端数据传输性能测量的影响	[40]
用户偏好效用函数/多参数效用函数	根据终端用户参数进行网络选择	RSS、价格、能量消耗、用户速度、负载	考虑了连接质量、用户偏好、价格的折衷	增加了效用函数设计的复杂度	[41]
用户满意函数	基于用户满意的多属性网络选择	价格、资源单元	最大化用户满意度和提高资源利用率	未详细说明属性权重分配	[42]

基于效用函数的网络接入选择策略有较快的决策速度和较低的算法复杂度,并且综合考虑了多种网络的性能指标及用户业务特性。但是在实际环境中用户的需求和网络状态是动态变化的,该类算法的目标函数一旦定义,在整个接入过程中无法调整,灵活性受到一定的限制。

2.6 基于模糊逻辑的接入选择算法

由于在 HWNs 的接入选择判断中会使用到一些难以量化的模糊信息,因此在进行接入选择判断时可

以使用基于模糊逻辑的计算方法。该类算法的主要思想是首先将各个网络参数进行模糊化处理并生成一个输入模糊集合,该集合通过模糊规则和一定的运算对应生成特定的输出模糊集合,最后将输出模糊集合结合接入选择算法把用户接入到最适合的网络。这个方法的关键在于合理的定义模糊集以及模糊准则。

Shi W 等^[43]基于径向基函数模糊方法并且结合神经网络设计智能化接入选择算法,该算法中模糊神经网络学习的目标为用户接入阻塞率,学习过

程中不断更新网络状态,并随时修正模糊神经网络参数的数值,使得算法可以接近预计的性能,实现智能化的接入选择判决. 进一步,该作者在此基础上提出一种对网络负载具有较好动态适应性的基于粒子群优化(PSO, Particle Swarm Optimization)模糊神经元的接入选择算法^[44],该算法中模糊神经元参数学习的目标为接入阻塞率,然后利用 PSO 算法的全局寻优能力对参数初值进行设定,从而提高参数学习的精度.

Chen, Y H 等^[45]提出一种模糊 Q 学习的接入选择方法,模糊 Q 学习接入控制系统由一个神经模糊推理系统许可评估、存储和决策三部分组成,许可评估主要负责计算每个子网可以支持接入业务的 QoS 需求和接入成本,存储主要负责多普勒频移和功率强度的计算,最后,决策采用极大极小定理用于确定为用户接入请求最合适的子网.

Chamodrakas, Ioannis 等^[46]提出的方法考虑到用户偏好、网络状况、服务质量和能耗的要求,所提

出的网络选择方法结合使用参数化效用函数,模拟不同应用程序的 QoS 需求,并采用不同的能耗度量实时和非实时应用,通过使用模糊集 TOPSIS 表示法解决多接入网络评价中参数不一致的问题,并采用效用函数修改网络选择排序异常问题.

Wu, Jung-Shyr 等^[47]采用灰色模糊控制过程实现联合无线资源管理接入控制,该文章的方法分成灰色模糊控制和灰色模糊多属性决策两部分. 该文章策略使用信号强度,路径损耗以及负载参数进行 EDGE、HSPA 和 LTE 的接入选择和切换控制,算法减小多用户之间的干扰和阻塞率,增加系统的无线电容量,提高负载均衡.

Kantubukta Vasu^[48]针对 HWNs 环境的不同应用需求提出基于 QoS 感知的模糊规则多属性接入选择算法,通过模糊逻辑规则并结合马尔可夫链计算比较各个网络的得分,算法能较好支持不同业务流.

上述基于模糊逻辑的接入选择算法对比具体如表 4 所示:

表 4 基于模糊逻辑的接入选择算法对比

Tab.4 Comparison of fuzzy logic based access selection algorithms

算法类型	目标	参数	优点	缺点	文献
模糊逻辑+神经网络	接入网络的接入阻塞率相等为参数强化学习目标进行网络选择	资源单元数、RSS	对网络负载有较好的动态适应性	不支持多种业务	[43]
粒子群优化(PSO)+模糊神经元	采用 PSO 算法确定模糊神经元参数初值进行网络选择	资源单元数、RSS	通过有全局寻优能力的 PSO 算法提高参数学习精度	神经元加权系数学习自适应调整的过程未说明	[44]
模糊逻辑+神经网络 Q 学习	在满足业务 QoS 和许可价格的情况下进行网络选择	业务 QoS 需求、干扰、用户数量、用户移动、价格	Q 学习在全局最优决策迭代计算中有较低的复杂度	分阶段多步计算过程导致时延增加	[45]
模糊集+TOPSIS	选择达到性能和能量消耗之间最佳平衡的接入网络	用户偏好、网络状况、QoS、能量消耗	有效的负载均衡和降低能量消耗,并支持不同应用	多参数混合方法计算复杂度较高	[46]
灰色模糊+多属性决策	选择最小化用户间影响并提高负载均衡的接入网络	RSS、路径损耗、负载	能够保证有较低的用户阻塞率	未指定产生参数具体权重的方法	[47]
模糊逻辑+马尔可夫链	计算所有可用网络的 0-100 得分并选择最高得分的网络	可用带宽、时延、抖动、误码率	结合马尔可夫链关联可用网络 QoS 的状态并支持不同应用	算法采用移动终端控制决策不利于网络间的资源分配	[48]

基于模糊逻辑的接入选择算法的优点是在接入网络数较多的情况下能够实现较准确的选网,在参数较少时算法效率较高. 但是随着参数数量的增加,导致模糊推理规则库的规模急剧增大,需要花费更多的计算资源.

2.7 基于博弈论的接入选择算法

在 HWNs 中无论是网络运营商之间、用户之间还是网络运营商与用户之间,任何用户接入网络都会对双方产生相应的影响,因此适合使用博弈论模型来对网络接入选择进行研究. 根据产生影响的双

方,可以分为用户间博弈接入、网络间博弈接入、用户与网络间博弈接入. 此外,根据博弈双方之间相互作用,又可以分为非合作博弈接入和合作博弈接入. 博弈参与者希望自身利益最大,不管其他参与者利益情况的是非合作博弈接入,相反,以最大化 HWNs 整体收益为目的的是合作博弈接入.

接入选择博弈模型由三个关键部分组成:参与者、策略和支付. 博弈中的参与者负责作出选择最大效用值网络的接入判决,参与者在 HWNs 环境下的接入行动受到策略的约束,并且需要计算出参与

者在各网络参数条件下的支付值. 对参与者来说, 其注重的是支付.

CHEN S Z 研究团队主要基于博弈理论对 HWNs 接入选择和无线资源分配展开研究, 提出一种连接数量及无线资源带宽分配的模型^[49], 并且证明了非合作博弈无线资源分配中的纳什均衡点, 其设计的接入选择算法考虑了用的业务量及其阻塞率. 进一步, 通过结合多主多从 Stackelberg 博弈模型^[50], 设计了用户收益和花费效用函数, 并且在网络服务定价的前提下, 效用函数可以满足凹函数条件, 用户间非合作博弈存在纳什均衡点, 在此基础上提出的 HWNs 定价和资源分配方案能够同时满足网络运营商和用户效用最大.

Chen Q B 等^[51]基于博弈理论对网络接入最优定价方案展开研究, 方法主要根据网络之间、用户与运营商之间的非合作和合作关系进行分析, 并求解了网络价格策略博弈模型的纳什均衡价格.

Niyato 等^[52-53]基于非合作博弈论设计面向 HWNs 的接入选择和无线资源分配算法, 算法将系统总带宽资源在各无线接入网的子区域进行划分,

基于非合作博弈论计算各接入网络对业务请求的可用带宽, 此外, 为了保证不同业务的优先级, 还设计了一个带宽资源预留门限.

Salih, Y K 等^[54]提出一个根据用户偏好确定 QoS 因素的网络选择模型, 并且将常用的简单加权方法 SAW 整合到非合作交易博弈框架中, 利用系统效用函数计算网络间的竞争, 算法通过用户和网络之间的协商使用户获得更优价格.

此外, 对于用户之间的博弈, Vassaki 等^[55]研究了接入选择中带宽分配问题, 将带宽分配问题建模为合作破产博弈模型, 并分析了约束平等规则、随机到达规则和塔木德规则用于保证最大化系统容量和带宽分配公平性. Zhu, Kun 等^[56]基于不完全信息的贝叶斯博弈对 HWNs 接入选择进行建模, 博弈参与者没有博弈对方收益函数的完整信息, 在网络的选择过程中采用最优反应动态, 并求解了贝叶斯纳什均衡.

上述基于博弈论的接入选择算法对比具体如表 5 所示.

表 5 基于博弈论的接入选择算法对比

Tab.5 Comparison of game theory based access selection algorithms

分类	算法模型	目标	支付	参数	优点	缺点	文献
网络间 博弈	非合作竞争博弈	以各个无线网络资源效用最大为目标进行网络选择	服务区域提供的带宽的效用	带宽、连接数	动态调整带宽资源的分配和连接的数量保证通信的可靠性	资源分配的公平性无法保障	[49]
	合作/非合作伯川德博弈	得到网络接入服务质量定价策略和选择性性价比最高的目标网络	用户需求及其服务价格函数	带宽、分组丢失率、功耗、时延、性价比	通过参数偏移度综合考虑网络接入服务质量中各参数的影响程度	未考虑不同接入网络价格竞争机制的动态特性	[51]
	非合作议价博弈	公平带宽资源分配和保证接入连接的服务等级	服务区域提供的带宽的效用	可用带宽	能够最大化网络利用和满足不同连接的 QoS 等级	过多的带宽分配变化影响连接性能	[52-53]
用户与 网络间 博弈	非合作多主多从博弈	满足网络运营商和用户效用最大的网络定价和资源分配	用户花费和带宽收益函数	价格、带宽	整个异构无线网络系统达到博弈纳什均衡	未对运营商之间博弈均衡点进行详细证明	[50]
	非合作交易博弈	网络选择中最优化用户满意及系统效用	系统总效用函数	用户偏好	在非合作博弈框架中整合简单加权法	权重的确定有待进一步说明	[54]
用户间 博弈	合作破产博弈	网络选择时进行最优带宽分配	带宽分配效用函数	可用带宽、功率、增益、	保证带宽分配的公平性和最大化系统容量	对多优先级业务的支持不好	[55]
	非合作贝叶斯博弈	最小化带宽需求并选择最优网络	用户带宽价格函数	带宽、价格	综合采用贝叶斯最优反应动态及积累最优反应动态	为了达到均衡分布, 需要执行过多的迭代构建收敛	[56]

基于博弈论的网络接入选择算法在多用户同时接入选网的环境下有较高的公平性和准确性,但是,该类算法有较高的复杂度,并且在一个博弈周期里只能得出一个用户的选网结果,选网效率较低。

2.8 其它模型接入选择算法及比较

除了上述各接入选择算法模型外,还有部分文献提到采用马尔可夫链和最优化方法模型进行网络接入选择^[12, 57-59]。

例如 DENG Q 等^[57]利用马尔可夫决策理论分析了不同用户业务的 QoS 需求、各种网络状态及状态之间的关系,求解了状态之间的转移概率,设计出一种 HWNs 中区分业务类型的接入控制算法。

Gelabert, Xavier 等^[58]将马尔可夫链模型嵌入到接入选择算法中,考虑了移动终端仅支持所有可用接入网络中的某部分接入网络的情形,并且通过可变数据流的性能度量去评估接入选择算法。Kosmides, Pavlos 等^[59]通过联合检查用户偏好和运营商偏好,并基于用户业务的需求设计最优化效用函数,把接入选择建模为 NP-hard 组合最优化问题。

综上所述,HWNs 接入选择中采用不同的数学模型具有不同的特性,在这里我们将各模型的目标、决策速度、复杂度、准确度、有效性等方面进行对比,具体如表 6 所示。

表 6 各接入选择算法模型比较

Tab.6 Comparison of different models for access selection

	MADM	效用函数	模糊逻辑	博弈论	最优化方法	马尔可夫链
目标	多属性组合	效用评估	模糊化处理	实体间平衡	整数规划	连续决策
决策速度	快	快	快	中	慢	中
复杂度	低	低	低	高	高	中
准确度	高	中	中	高	高	中
有效性	高	中	中	高	中	中
以用户为中心	是	是	是	否	否	是

3 HWNs 接入选择存在的问题、面临的挑战及展望

3.1 存在问题

尽管许多学者对 HWNs 的接入选择问题进行了大量的研究,但是由于 HWNs 接入技术的多样性和复杂性,一方面移动终端要获得“最合适”连接,另一方面网络既要满足不同业务的 QoS 需求,又要使资源利用率达到最大,所以 HWNs 接入选择算法还存在许多需要解决的问题以及需要优化的地方^[9, 18, 60],总体来说目前仍然存在着以下不足:

1) 接入选择算法的设计没有与资源管理架构设计结合在一起进行,算法仅适用于某种特定场景,缺乏灵活性,较难适应实际的 HWNs 融合环境。

2) 由于接入选择需要考虑用户层面、业务层面和网络层面这三方面的因素,基于单因素的接入选择算法虽然计算复杂度低,但是有效性却较差。此外,有部分算法在设计中尝试将所有影响因素全部加入考虑,却导致计算复杂度剧增,不适合实际应用环境。

3) 部分算法依据“最合适连接”原则,希望能够为用户接入到最能保障业务服务质量的网络,但是却并没有考虑到网络资源的整体利用,更没有对具体资源分配的大小展开研究,没有同时兼顾用户服务质量与网络资源利用。

3.2 挑战与展望

3.2.1 HWNs 的多接入控制问题

未来无线网络技术的演进使得各种不同体系结构和接入模式的无线网络持续增加。同时,随着无线终端性能的不不断提高,终端可以通过多链路同时并行接入到多个无线网络。多链路采用 Multi-RAT (Multiple Radio Access Technology) 技术,终端的无线接入模块支持多协议接入模式,能够通过不同的链路同时连接多个无线网络,实现多网络带宽聚合利用^[61],并可以在 HWNs 的不同网络中无缝切换。因此,研究 HWNs 中多链路接入控制问题对于实现 HWNs 融合具有积极的意义。

目前,已有部分团队在研究 HWNs 的多接入控制问题^[10, 62-66]。其中文献[62]提出一种将业务数据流分割,分别在不同的接入网进行传输的方法 P-MRA,数据流能获得不同接入网的聚合带宽服务,并且通过实验证明该方法有较好的性能。文献[10]设计了 HWNs 多接入环境下的功率和频谱分配算法,但是算法假设所有终端都支持多链路模式,没有考虑单链路/多链路用户共存的情况,算法有一定的局限性。

相比传统的仅支持接入单个网络的单链路用户,多链路用户的某个网络链路出现故障时,其余连接的链路仍然能够保证用户数据传输,有效提高了通信的可靠性。因此,解决 HWNs 的多接入控制问

题将有效提升 HWNs 的整体效能,促进 HWNs 融合具有重要的意义。

3.2.2 HWNs 无线资源管理及 QoS 保障

传统的无线资源管理算法的主要目标是在一定数量的总系统资源环境下,通过合理的调度最大限度地为同构网络内的用户提供 QoS 保障服务。HWNs 环境下的无线资源管理功能相对于传统同构网络,还需要进一步综合考虑不同接入架构、多模终端、多业务需求及用户信息等因素,设计适用于 HWNs 的联合无线资源管理架构及算法^[13, 67-69]。

此外,HWNs 融合的目标是为用户提供无缝的、高质量的 QoS 保障服务^[54]。不同于传统的无线网络,HWNs 中异构环境结构复杂、动态变化等都对提升用户业务 QoS 保障带来了新的挑战。

目前已有相关研究工作在这方面取得了一定的进展^[67, 70-72],如文献^[70]设计了支持用户体验质量的 HWNs 体系架构,该架构通过增加无缝移动质量感知、质量评估、动态服务等级映射和内容自适应调度等扩展了接入协议,考虑了移动用户需求和网络可用资源使用情况。文献^[71]针对 HWNs 中有限的无线资源设计了一套支持 QoS 的自适应 MAC 协议,该协议利用混合自适应行为提高信道利用率,并且在接入中集成了支持 QoS 和公平数据传输的优先级调度。

因此,如何利用 HWNs 在不同接入技术、重叠网络架构、多业务流量负载等方面的特点,在为用户提供 QoS 保证接入的同时,最优化 HWNs 资源利用成为未来 HWNs 发展中亟需解决的重要问题。

4 结束语

在 HWNs 中,由于无线信号重叠覆盖、终端业务不同 QoS 需求、无线网络性能差异、用户喜好不同等因素的存在,设计能够保障用户接入最合适网络的接入选择算法是 HWNs 进一步发展中需要解决的重要问题。

针对这个问题,国内外大量的研究人员进行不懈的探索,收获不少成果。本文主要对 HWNs 接入选择算法成果进行了分类归纳,详细分析各接入选择算法的思想及其优缺点,总结目前该类算法主要存在的问题,并提出了未来的研究方向。

参考文献

- [1] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y, et al. a survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10-21.
- [2] GHOSH A, MANGALVEDHE N, RATASUK R, et al. Heterogeneous cellular networks: from theory to practice[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6): 54-64.
- [3] MALIK A, QADIR J, AHMAD B, et al. QoS in IEEE 802.11-based wireless networks: a contemporary review[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 55: 24-46.
- [4] FERRUS R, SALLENTO O, AGUSTI R. Interworking in heterogeneous wireless networks: comprehensive framework and future trends[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(2): 22-31.
- [5] WANG N, CHIANG Y, WONG J. Hierarchical mobile IPv6 mobility management in heterogeneous 3G/WLAN networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(4): 2181-2200.
- [6] JO M, MAKSYMUK T, BATISTA R L, et al. A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 54-62.
- [7] WANG L, LU Z, WEN X, et al. Converged management in heterogeneous wireless networks based on resource virtualization[J]. Mobile Networks & Applications, 2015, 20(1): 53-61.
- [8] REN W, ZHAO Q, SWAMI A. Connectivity of heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(7): 4315-4332.
- [9] SALIH Y K, SEE O H, IBRAHIM R W, et al. An overview of intelligent selection and prediction method in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8): 3138-3154.
- [10] CHOI Y, KIM H, HAN S, et al. Joint resource allocation for parallel multi-radio access in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3324-3329.
- [11] SI P, JI H, YU F R. Optimal network selection in heterogeneous wireless multimedia networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(5): 1277-1288.
- [12] KHLOUSSY E, GELABERT X, JIANG Y. Investigation on MDP-based radio access technology selection in heterogeneous wireless networks[J]. Computer Networks, 2015, 91: 57-67.
- [13] FOOLADIVANDA D, ROSENBERG C. Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 248-257.
- [14] MEHBODNIYA A, AISSA S, ADACHI F. Efficient resource utilization for heterogeneous wireless personal area networks[J]. IEICE Transactions On Communications, 2013, 96(6): 1577-1587.
- [15] ZEKRI M, JOUABER B, ZEGHLACHE D. A review on mobility management and vertical handover solutions over heterogeneous wireless networks[J]. Computer Communications, 2012, 35(17): 2055-2068.
- [16] FERNANDES S, KARMOUCH A. Vertical mobility management architectures in wireless networks: a comprehensive survey and future directions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(1): 45-63.
- [17] KASSAR M, KERVILLA B, PUJOLLE G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2607-2620.
- [18] AHMED A, BOULAHIA L M, GAITI D. Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: a state-of-the-art and a classification[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(2): 776-811.
- [19] YAN X, SEKERCIOGLU Y A, NARAYANAN S. A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(11): 1848-

- 1863.
- [20] WANG L, KUO G G S. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks—a tutorial [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, 15(1): 271–292.
- [21] SONG Q, JAMALIPOUR A. An adaptive quality-of-service network selection mechanism for heterogeneous mobile networks [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2005, 5(6): 697–708.
- [22] ZHOU T, HUANG Y, YANG L. Joint user association and resource partitioning with QoS support for heterogeneous cellular networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(1): 383–397.
- [23] HANJIN L, DONGWOOK K, BYUNGCHUN C, et al. Adaptive hysteresis using mobility correlation for fast handover [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(2): 152–154.
- [24] ROY S D, REDDY S R V. Signal strength ratio based vertical handoff decision algorithms in integrated heterogeneous networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 77(4): 2565–2585.
- [25] AHUJA K, SINGH B, KHANNA R. Network selection algorithm based on link quality parameters for heterogeneous wireless networks [J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3657–3662.
- [26] 盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 异构无线网络中基于业务转移和接入控制的混合负载均衡 [J]. *电子学报*, 2013, 41(2): 321–328.
SHENG Jie, TANG Liangrui, HE Jianhong. Hybrid load balancing algorithm based on service transformation and admission control in heterogeneous wireless networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 321–328.
- [27] GERASIMENKO M, HIMAYAT N, SHU-PING Y, et al. Characterizing performance of load-aware network selection in multi-radio (WiFi/LTE) heterogeneous networks [C]//2013 IEEE Globecom Workshops. Atlanta: IEEE, 2013: 397–402.
- [28] MA D, MA M. Proactive load balancing with admission control for heterogeneous overlay networks [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2013, 13(18): 1671–1680.
- [29] HASIB A, FAPOJUWO A O. Analysis of common radio resource management scheme for end-to-end QoS support in multiservice heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2426–2439.
- [30] CHEN H, CHENG C, YEH H. Guard-channel-based incremental and dynamic optimization on call admission control for next-generation QoS-aware heterogeneous systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(5): 3064–3082.
- [31] MIAO J, HU Z, YANG K, et al. Joint power and bandwidth allocation algorithm with QoS support in heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(4): 479–481.
- [32] 刘胜美, 孟庆民, 潘甦, 等. 异构无线网络中基于 SINR 和层次分析法的 SAW 垂直切换算法研究 [J]. *电子与信息学报*, 2011(01): 235–239.
LIU Shengmei, MENG Qingmin, PAN Su, et al. A simple additive weighting vertical handoff algorithm based on SINR and AHP for heterogeneous wireless networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011(01): 235–239.
- [33] 唐良瑞, 李文猛, 盛洁, 等. 基于混沌遗传的异构无线网络接入选择策略 [J]. *电子学报* 2014, 42(8): 1564–1570.
TANG Liangrui, LI Wenmeng, SHENG Jie, et al. A chaos genetic algorithm based access selection in heterogeneous wireless networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(8): 1564–1570.
- [34] 魏淑芝, 朱琦. 基于网络选择的视频通信带宽博弈算法 [J]. *通信学报*, 2015, 36(2): 216–224.
WEI Shuzhi, ZHU Qi. Bandwidth allocation games based on network selection for video communication [J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(2): 216–224.
- [35] AHUJA K, SINGH B, KHANNA R. Network selection based on weight estimation of QoS parameters in heterogeneous wireless multimedia networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 77(4): 3027–3040.
- [36] VERMA R, SINGH N P. GRA based network selection in heterogeneous wireless networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 72(2): 1437–1452.
- [37] 姜建, 李建东, 刘鑫一. 异构无线网络环境下的联合网络选择策略 [J]. *计算机学报*, 2014, 37(2): 407–413.
JIANG Jian, LI Jiandong, XIN Yi. Joint network selection strategy in heterogeneous wireless networks [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(2): 407–413.
- [38] JIANG J, LI J, HOU R, et al. Network selection policy based on effective capacity in heterogeneous wireless communication systems [J]. *Science China—Information Sciences*, 2014, 57(0223092).
- [39] 谢显中, 肖博仁, 马彬, 等. 代价函数数值可变的速率自适应的异构无线网络垂直切换算法 [J]. *电子学报*, 2011, 39(10): 2417–2421.
XIE Xianzhong, XIAO Boren, MA Bin, et al. Cost function weight-variable and speed-adaptive vertical handoff algorithm for a vehicle terminal in heterogeneous wireless networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(10): 2417–2421.
- [40] 范文浩, 刘元安, 吴帆. 异构无线网络中多模终端多接入选择机制研究 [J]. *通信学报*, 2012, 33(7): 183–190.
FAN Wenhao, LIU Yuanan, WU Fan. Research on multi-access selection mechanism for multi-mode terminals in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(7): 183–190.
- [41] QUOC-THINH N, AGOULMINE N, CHERKAOU E H, et al. Multicriteria optimization of access selection to improve the quality of experience in heterogeneous wireless access networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(4): 1785–1800.
- [42] EL HELOU M, IBRAHIM M, LAHOUD S, et al. Radio access selection approaches in heterogeneous wireless networks [C]//2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB). Lyon: IEEE, 2013: 521–528.
- [43] SHI W, FAN S, WANG N, et al. Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(9): 151–156.
- [44] SHI W, FAN S, WANG N, et al. A PSO-fuzzy neuron based access selection in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(2): 58–62.
- [45] CHEN Y, CHANG C, HUANG C Y. Fuzzy Q-learning admission control for WCDMA/WLAN heterogeneous networks with multimedia traffic [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(11): 1469–1479.
- [46] CHAMODRAKAS I, MARTAKOS D. A utility-based fuzzy TOPSIS method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(4): 3734–3743.
- [47] WU J, HUEY R. Improved joint radio resource management usage grey fuzzy control in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal of Internet Technology*, 2015, 16(5): 777–788.
- [48] VASU K, MAHESHWARI S, MAHAPATRA S, et al. QoS-aware

- fuzzy rule-based vertical handoff decision algorithm incorporating a new evaluation model for wireless heterogeneous networks[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications And Networking*, 2012, 2012(1): 1-22.
- [49] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. *软件学报*, 2010, 21(8): 2037-2049.
- LI Mingxin, CHEN Shanzhi, XIE Dongliang, et al. Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(8): 2037-2049.
- [50] 姜永, 胡博, 陈山枝. 异构无线网络用户网络关联优化: 一种基于群体博弈的方法[J]. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1249-1261.
- JIANG Yong, HU Bo, CHEN Shanzhi. User-network association optimization in heterogeneous wireless networks: a population game-based approach[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1249-1261.
- [51] CHEN Q B, ZHOU W G, CHAI R, et al. Game-theoretic approach for pricing strategy and network selection in heterogeneous wireless networks[J]. *Iet Communications*, 2011, 5(5): 676-682.
- [52] NIYATO D, HOSSAIN E. A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(3): 332-345.
- [53] NIYATO D, HOSSAIN E. Bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless access networks: a noncooperative game theoretical approach[C]//2006 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2006). San Francisco: IEEE, 2006.
- [54] SALIH Y K, ONG H S, IBRAHIM R W, et al. A novel noncooperative game competing model using generalized simple additive weighting method to perform network selection in heterogeneous wireless networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 28(6): 1112-1125.
- [55] VASSAKI S, PANAGOPOULOS A D, CONSTANTINOPOULOS P. Bandwidth allocation in wireless access networks: Bankruptcy game vs cooperative game[C]//International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops. [s. l.]: IEEE, 2009.
- [56] Zhu K, Niyato D, Wang P. Network selection in heterogeneous wireless networks: evolution with incomplete information[C]//IEEE Wireless Communication & Networking Conference. Doha: IEEE, 2010.
- [57] 邓强, 陈山枝, 胡博, 等. 异构无线网络中基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制的研究[J]. *通信学报*, 2010, 31(12): 27-36.
- DENG Qiang, CHEN Shanzhi, HU Bo, et al. Research of service-differentiated admission control based on Markov decision processes in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(12): 27-36.
- [58] GELABERT X, PEREZ-ROMERO J, SALLENTO O, et al. A markovian approach to radio access technology selection in heterogeneous multiaccess/multiservice wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(10): 1257-1270.
- [59] KOSMIDES P, ROUSKAS A, ANAGNOSTOU M. Utility-based RAT selection optimization in heterogeneous wireless networks[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2014, 12(10): 92-111.
- [60] MAHMOOD N H, YILMAZ F, ALOUINI M, et al. Heterogeneous next-generation wireless network interference model-and its applications[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014, 25(5): 563-575.
- [61] CHEBROLU K, RAO R R. Bandwidth aggregation for real-time applications in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(4): 388-403.
- [62] ZHENG J, LI J, LIU Q, et al. Performance analysis of three multi-radio access control policies in heterogeneous wireless networks[J]. *ScienceChina-Information Sciences*, 2013, 56(12): 1-10.
- [63] ZHANG L, ZHU Q, ZHAO S. Multi-access selection algorithm based on joint utility optimization for the fusion of heterogeneous wireless networks[J]. *Ieice Transactions on Communications*, 2014, E97B(11): 2269-2277.
- [64] MIAO J, HU Z, WANG C, et al. Optimal resource allocation for multi-access in heterogeneous wireless networks[C]//IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC SPRING). Yokohama: IEEE, 2012.
- [65] FAN W, LIU Y, WU F. Research on multi-access selection mechanism for multi-mode terminals in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(7): 183-190.
- [66] YU G, JIANG Y, XU L, et al. Multi-objective energy-efficient resource allocation for multi-rat heterogeneous networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(10): 2118-2127.
- [67] XUE P, GONG P, PARK J H, et al. Radio resource management with proportional rate constraint in the heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(3): 1066-1075.
- [68] BULJORE S, HARADA H, FILIN S, et al. Architecture and enablers for optimized radio resource usage in heterogeneous wireless access networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 122-129.
- [69] CARMEN LUCAS-ESTAN M, GOZALVEZ J. On the real-time hardware implementation feasibility of joint radio resource management policies for heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(2): 193-205.
- [70] ROSARIO D, CERQUEIRA E, NETO A, et al. A QoE handover architecture for converged heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Networks*, 2013, 19(8): 2005-2020.
- [71] SOUIL M, BOUABDALLAH A, KAMAL A E. Efficient QoS provisioning at the MAC layer in heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2014, 43(5): 16-30.
- [72] LOPEZ-BENITEZ M, GOZALVEZ J. Common Radio resource management algorithms for multimedia heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(9): 1201-1213.

(编辑 王小唯, 苗秀芝)