

文章编号:1007-2780(2019)07-0708-08

异构无线网络多用户多业务接入中 多目标优化控制方法研究

董晓庆^{1,2}, 程良伦¹, 陈洪财², 郑耿忠², 谢森林^{2*}

(1. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006

2. 韩山师范学院 物理与电子工程学院, 广东 潮州 521041)

摘要:针对多异构网络重叠覆盖、多用户多业务共存环境下,用户最大化传输速率易致网络负载不均衡的问题,提出一种基于非支配排序遗传算法的业务接入控制方法。该方法首先以传输速率最大化及网络负载最均衡为目标,以带宽资源受限为约束,构建了传输速率最大化及网络负载最均衡的双目标优化模型;然后基于多目标优化方法非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)求解该业务接入控制问题。仿真结果表明,所提算法兼顾了用户的传输速率需求及网络间的负载均衡,取得较好的效果。

关键词:异构无线网络;负载均衡;传输速率;非支配排序;多目标优化

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193407.0708

Multi-objective optimization control method for multi-user multi-service access in heterogeneous wireless networks

DONG Xiao-qing^{1,2}, CHENG Liang-lun¹, CHEN Hong-cai², ZHENG Geng-zhong², XIE Sen-lin^{2*}

(1. School of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Hanshan Normal University,
Chaozhou 521041, China)

Abstract: Aiming at the problem that multi-heterogeneous network overlap coverage and multi-user multi-service coexistence environment, users maximizing the transmission rate may cause the network load to be unbalanced, a service access control method based on non-dominated sorting genetic algo-

收稿日期: 2019-02-19; **修订日期:** 2019-04-17.

基金项目: 广东省重大科技专项 (No. 2015B010104005); 广东省科技计划项目 (No. 2016A020209012, No. 2017B090901019, No. 2015A010103015); 广东省自然科学基金 (No. 2014A030307014); 韩山师范学院校级教改项目 (No. Z18031); 广东省教育厅创新强校项目 (No. 2015KQNCX096)

Supported by Major Projects in Guangdong Province (No. 2015B010104005); Science and Technology Project of Guangdong Province (No. 2016A020209012, No. 2017B090901019, No. 2015A010103015); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2014A030307014); School-level Education Reform Project of Hanshan Normal University (No. Z18031); Innovation and Strong School Project of Guangdong Provincial Department of Education (No. 2015KQNCX096)

* 通信联系人, E-mail: senlinxie@163.com

rithm is proposed. The strategy firstly takes the maximum transmission rate and the load balance of the system as the objective function, and the bandwidth resource limitation as the constraint condition, and constructs the two-objective optimization model with maximum transmission rate and most balanced network load. Then the service access control problem is solved based on the multi-objective optimization Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). The simulation results show that the proposed algorithm takes into account the user's transmission rate requirements and load balancing between networks, and achieves better results.

Key words: heterogeneous wireless network; load balancing; transmission rate; non-dominated sorting; multi-objective optimization

1 引言

用户业务量及用户终端数量近年来呈爆发性增长态势,单一通信网络已无法满足用户的需求,未来的无线通信网络必然是多网络共存、融合、优势互补,这也是下一代无线通信网络的发展趋势^[1-2]。多模终端可通过多无线电接入技术选择不同的接入网络(比如蜂窝网络、无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)、全球互通微波访问网络(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMax)等)进行数据传输。在异构网络重叠覆盖多用户多业务共存环境下,如何为用户选择合适的接入网络及分配带宽,以保障网络系统可靠性并满足不同用户的服务需求,已成为研究热点^[3-4]。

目前异构无线网络的网络接入及资源分配方面已取得一些研究成果。文献[5]针对带宽资源受限条件下如何选择接入网络以最大化传输速率的问题,提出了一种基于牛顿迭代算法的网络选择方法。该方法首先分别以信息传输速率最大化为目标及带宽资源受限为约束对网络接入问题进行建模,然后通过牛顿迭代算法求得信息传输速率最大化的接入网络及在该网络中所需带宽资源理论值,把用户分配到理论值与实际带宽需求差值最小的网络中,以提高带宽资源的利用率。文献[6]提出了一种基于离散粒子群的网络选择接入的多目标优化方法,该方法首先通过惩罚函数法将多优化目标转换为单目标,然后利用离散粒子群算法求解,提高了用户满意度。文献[7]分析了无线异构网络中用户总信息传输速率与网络接入及带宽分配的关系,将复杂的多链路动态接入建模为系统传输速率最大化问题,提出一种支持

多链路接入的多阶段求解方法,从而最大化总用户信息传输速率。文献[5-7]把提高信息传输速率作为目标,但忽略了网络间的负载差异,易造成网络间负载不均衡。文献[8]利用博弈理论构建了异构无线网络中的带宽资源分配及用户终端网络关联理论模型,提出了可靠通信的接入控制方法以降低用户接入阻塞率,但非合作博弈中纳什均衡的存在性和唯一性难以确定,求解最佳方案难度较大。文献[9]针对负载均衡问题,通过构建与实际流量模型相符的网络节点分簇拓扑结构,提出了一种基于梯度的负载均衡非均匀分簇方法,在一定程度上提高了负载均衡并缓解网络拥塞情况。文献[10]分别分析了用户的资源占用模型、阻塞率模型及网络负载模型,并建模了总资源占用最小化、业务阻塞率最低及网络负载最均衡的多目标优化模型,并通过最大化满意度将多目标转化为单目标,最后利用遗传算法求解,但该方法在网络负载较重时,用户接入阻塞率偏高。文献[11]针对现有异构无线网络接入多目标优化方法大多将多目标转化为单目标,没有充分考虑各目标相对关系的问题,提出一种基于分解的多目标进化算法,然后通过非支配排序得到最优网络接入方案,在用户阻塞率、负载均衡及资源占用取得较好的折中效果。文献[9-11]从网络的角度对系统性能进行优化,但忽略了用户的速率需求。

综上所述,在异构无线网络多用户多业务接入环境下,目前在网络侧的负载均衡、阻塞率方面及用户侧的速率需求方面均取得一定的研究成果,但联合考虑网络负载均衡及用户速率需求的研究成果还较少。因此,为保证系统通信速率及网络间的负载均衡,本文以系统通信速率及负载均衡为目标,构建多目标优化控制模型,提出一种基于多目标优化的业务接入控制算法,以满足用

户的服务质量需求及保障网络的可靠性。

2 网络模型及问题定义

2.1 网络模型

如图 1 所示,假设存在 N 个异构无线网络重叠覆盖(包括蜂窝网络、WiMax 及 WLAN), M 个多模用户终端可以根据自身服务质量(Quality of Service, QoS)需求及网络效益选择接入任一网络。载波传输方案采用基于多用户正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[12-13],基本的资源分配单元为一个子时隙和一个子信道构成的二维资源单元(Two-dimensional Resource Unit, TRU)^[10,14],网络 k ($1 \leq k \leq N$) 能提供的 TRU 资源数 T_k 为:

$$T_k = \frac{N_k}{F_k} \cdot \frac{TS_k}{SP_k \cdot S_k}, \quad (1)$$

其中, N_k 为网络 k 的子载波总数, F_k 为每个子信道包含子载波个数, TS_k 为每帧的帧长, SP_k 为 OFDM 的符号周期, S_k 为每个时隙包含的符号个数。

令 X_{jk} 表示用户 j 的网络接入情况,若用户接入网络 k ,则 X_{jk} 等于 1,否则为 0。因此用户终端的网络接入情况可表示为一个 $M \times N$ 的 0/1 二维矩阵,如公式(2)。

$$X_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{终端 } j \text{ 未接入网络 } k \\ 1, & \text{终端 } j \text{ 接入网络 } k \end{cases}. \quad (2)$$

2.1.1 系统负载率模型

设业务 j 接入网络 k 后,需要网络提供的 TRU 资源数为 t_{jk} ,那么网络 k 分配给所有用户的资源数量为:

$$B_k = \sum_{j=1}^M x_{jk} t_{jk}, \quad (3)$$

其中, B_k 为用户所占用的网络资源。根据公式(1)中的网络可提供资源,可推导出网络 k 的负载率为:

$$\eta_k = \frac{B_k}{T_k} = \frac{\sum_{j=1}^M x_{jk} t_{jk}}{T_k}. \quad (4)$$

2.1.2 传输速率模型

网络 k 的信息传输速率由接入该网中的所有用户终端决定,根据香农定理,网络 k 的信息传输速率可表示为:

$$r_k = \sum_{j=1}^M \omega_{jk} b_{jk} \log_2 \left(1 + \frac{S_{jk}}{N_{jk}} \right), k = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

其中, b_{jk} 表示用户 j 在网络 k 中分配到的信道带宽, S_{jk} 、 N_{jk} 分别表示信号功率及噪声功率, ω_{jk} 表示用户 j 在网络 k 中的效益因子。

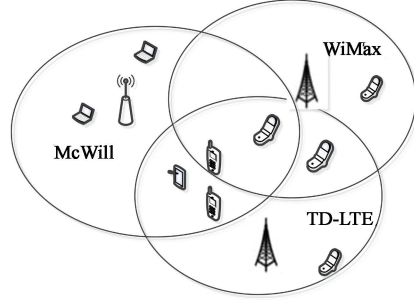


图 1 重叠覆盖的异构无线网络

Fig.1 Overlapping heterogeneous wireless networks

2.2 问题定义

用户的网络接入及带宽分配影响到系统的传输速率及网络间负载,本文从整个异构无线网络的角度,通过为用户选择合理的接入网络及资源分配,使系统获得最大传输速率并保持网络间的负载均衡。因此,本文将目标函数建模为最均衡网络负载及最大化系统传输速率。

本文以负载率方差衡量各异构网络间负载均衡程度,负载率方差最小化表征负载最均衡,由 2.1 节中的负载率模型,负载最均衡可表示如下:

$$\min V = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\eta_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \eta_k \right)^2. \quad (6)$$

从整个网络的角度,系统传输速率为各个异构网络获得的传输速率之和,根据公式(5)网络 k 的传输速率,系统传输速率最大化可表示如下:

$$\begin{aligned} \max R &= \max \sum_{k=1}^N r_k = \\ &= \max \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \omega_{jk} b_{jk} \log_2 \left(1 + \frac{S_{jk}}{N_{jk}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

由公式(6)、(7),可以推导出以系统传输速率最大化及网络负载最均衡为目标,以带宽资源限制作为约束条件的数学模型,具体如下:

$$\begin{aligned} \min V &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left(\eta_k - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \eta_k \right)^2 \\ \max R &= \max \sum_{k=1}^N r_k = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \omega_{jk} b_{jk} \log_2 \left(1 + \frac{S_{jk}}{N_{jk}} \right) \\
& \quad s.t. \\
& \sum_{j=1}^M t_{jk} = \sum_{j=1}^M x_{jk} t_{jk} \leq B_k, k=1, 2, \dots, M, \\
& t_{jk} \geq 0, j=1, 2, \dots, M_k; k=1, 2, \dots, M, \\
& \sum_{k=1}^N x_{jk} \leq 1, j=1, 2, \dots, M, \quad (8)
\end{aligned}$$

其中约束条件1表示接入网络 k 的所有用户占用资源总和不得超过网络 k 所能提供的总资源,约束条件3表示每个用户最多只能接入一个网络。该优化模型既考虑了用户的传输速率需求,同时保证了网络间的负载均衡。

3 接入控制方法

本文在带宽资源受限条件下,以网络负载最均衡及系统传输速率最大化为目标,构建了如公式(8)所示的多目标优化模型。对于约束条件的多目标优化问题,难以利用多项式时间算法求解,因此,本文基于非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解复杂的资源分配及网络接入问题。

NSGA-II 利用强大的全局搜索能力较好地解决了多目标优化问题,其具有进化操作规则的概率性、充分利用适应值函数而不需要其它先验知识等特点,且在解空间中沿多个方向并行搜索,不易陷入局部最优,适合求解传统方法难以解决的复杂优化问题。但由于非支配排序算法求得的一组最优帕累托解集中不存在一个可使所有优化目标同时最优的解,而本文需要求得唯一方案以确定网络接入及带宽资源分配,因此本文对经典的非支配排序算法进行改进,提出了一种折中的决策精选策略对得到的帕累托解进行排序。在得到帕累托解集后,该方法通过计算个体各个优化目标值与对应最优值的归一化趋近度,一个优化目标对应一个趋近度,并根据优化目标的重要性赋予一定的权重;最后将同一个体所有优化目标对应的趋近度相加以表征该个体对最优个体的趋近度,趋近度越小表示越接近最优值,并选择趋近度最小的个体作为本文的解。同时,本文对 NSGA-II 算法进行适应性处理,以解决复杂的资源分配及网络接入问题。下面将给出本文改进的非支配排序算法关键步骤。

3.1 个体编码

个体表示问题的解决方案,给出用户终端的接入网络及选择的带宽资源,一定数量的个体组成一个种群。基于此,本文采用二进制方式对个体进行编码,个体中基因对应用户终端,基因的值表示用户接入的网络及分配到的资源,所以 m 个用户,需要 m 个基因。下面给出一个个体实例,假设在一个由3个异构无线网络重叠覆盖场景中,每个网络有10个TRU资源,网络中有8个用户申请接入,那么需要8个基因表示8个用户的资源分配情况,每个基因需要用2位表示接入的网络,4位表示所选TRU资源,共48位组成了一个个体,其编码方案如图2所示。

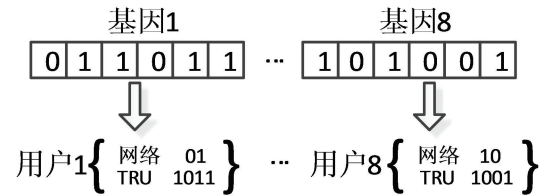


图2 个体编码方式

Fig.2 Chromosome coding

3.2 非支配排序

本文的优化目标包括传输速率最大化及负载最均衡,1个个体确定1个网络接入、资源分配方案及对应的系统传输速率、网络间负载方差目标值,本文基于传输速率及负载方差目标值进行非支配排序,排序方法如下:(1)目标值处理:同时考虑网络资源约束及终端接入约束,对于符合约束条件的个体,取其目标值进行排序,否则令其传输速率为0、网络间负载方差为最大值,以淘汰不符合约束条件的个体;(2)非支配排序:设 a 和 b 为种群中任意2个不同个体,如果满足 a 个体的目标值都不比 b 差,且至少存在一个目标值优于个体 b ,则称 a 为非支配解, b 被 a 所支配;如果两个个体目标值相等或互有优劣,则 a 、 b 互不支配,分配在同一层级。

3.3 遗传操作

遗传操作包括选择、交叉及变异,具体如下:(1)选择:采用二元锦标赛选择策略,通过该策略选择 $\frac{P}{2}$ (P 表示种群规模)个个体进行后续的交叉及变异操作;(2)交叉:本文采用双点交叉算法,

首先在 $\frac{P}{2}$ 个优选染色体中随机选择两个个体, 然后随机产生两个交叉点, 并交换个体在交叉点之间的基因位; (3) 变异: 根据变异概率在 $\frac{P}{2}$ 个优选个体中随机选择一个, 并随机选择一个基因位进行变异操作, 以产生新的染色体。

3.4 决策精选

利用非支配排序算法求得一组最优帕累托解, 该组解集中不存在一个可使所有优化目标同时最优的解, 而本文需要求得唯一方案以确定网络接入及带宽资源分配, 因此本文提出了一种折中的决策精选策略, 该策略如式(9)所示:

$$Z_j = \sum_{i=1}^y \lambda_i \frac{|f_i^j - f_i^{\text{opt}}|}{f_i^{\text{max}} - f_i^{\text{min}}}, \quad (9)$$

式(9)衡量了个体各个目标值对最优值的趋近程度, 其中 Z_j 表示个体 j 的趋近程度。 y 表示优化目标的个数, f_i^j 表示个体 j 第 i 个优化目标值, f_i^{opt} 、 f_i^{max} 及 f_i^{min} 分别表示该组最优帕累托解第 i 个优化目标的最优值、最大值及最小值; 对于目标最大化问题, $f_i^{\text{opt}} = f_i^{\text{max}}$, 如本文的传输速率最大化; 对于目标最小化问题, $f_i^{\text{opt}} = f_i^{\text{min}}$, 如本文的负载方差最小化; 为了用统一标准衡量各优化目标对最优值的趋近程度, 需要做归一化处理, 并令各个目标的趋近度相加以表征该个体的最终趋近度, 趋近度 Z_j 越小表示越趋近最优值; λ_i 表示各优化目标的权重系数

且 $\sum_{i=1}^y \lambda_i = 1$, 权重值表示用户对该目标的注重程度, 值越大越重要。

综上所述, 本文基于改进的非支配排序方法对染色体进行排序, 再利用遗传操作实现染色体的迭代更新, 最后通过决策精选策略优选出 1 个折中优化方案。

4 实验结果分析

4.1 实验参数设置

对于优化问题, 采用凸优化理论求解及利用启发式智能算法求解是两类常用的解决方法, 文献[5]基于牛顿迭代算法(Newton Iteration, NI)的网络选择策略及文献[10]中的多目标优化控制(Multi-objective Optimization

Control, MOC)算法是这两类方法的典型代表。因此, 本章通过仿真将本文基于 NSGA-II 的算法与文献[5]的 NI 算法及文献[10]的 MOC 算法进行对比分析, 以测试算法的有效性。假设 3 种目前常见的网络重叠覆盖, 如图 1 所示, 网络 1、网络 2、网络 3 分别表示 WiMax、多载波无线信息本地环路网络(Multi-Carrier Wireless Information Local Loop, McWiLL)和分时长期演进网络(Time Division Long Term Evolution, TD-LTE), 网络半径分别为 3, 3, 1.5 km, 基站位置随机生成。WiMax 和 TD-LTE 的网络参数设置同文献[15], McWiLL 网络参数设置同文献[16]。

假设各异构无线网络中初始业务分布随机产生, 同时随机生成 100 个新到通信业务, 其中实时业务带宽需求随机均匀分布在 50~200 kb/s, 非实时业务分布在 40~140 kb/s, 两种业务各约占 50%。本文所提算法参数如下: 初始种群随机生成, 种群规模 $P = 60$, 交叉概率 p_c 为 0.9, 变异概率(p_m)为 0.1, 迭代次数为 200。

4.2 算法性能分析

下面分别对算法的负载率均衡程度及传输速率进行对比分析。

4.2.1 归一化负载率对比

图 3 给出了本文所提算法在 3 个网络中的负载均衡状况, 如图所示, 随着用户数量的增加, 用户占用网络资源相应增加, 3 个网络负载率均上升; 在负载率上升的过程中, 3 条曲线始终保持缠绕, 在不同用户数下负载率差距较小, 网络间负载始终较为均衡。

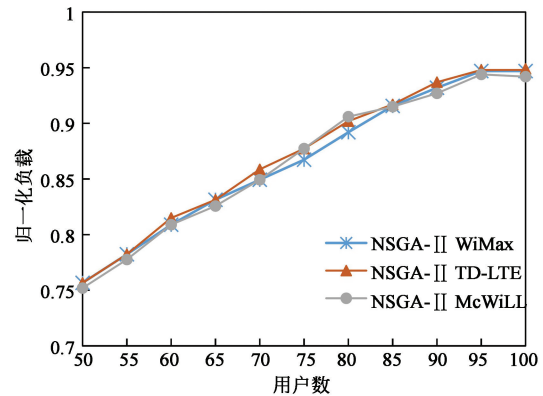
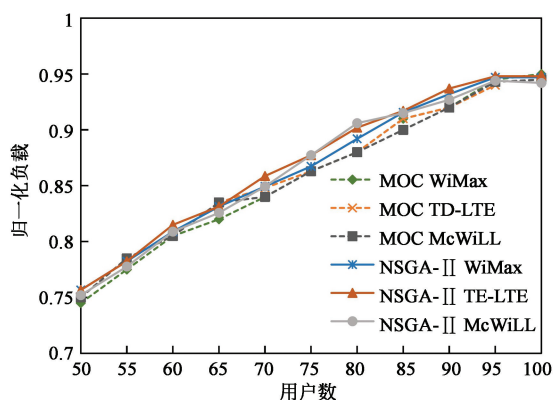


图 3 本文算法的归一化负载

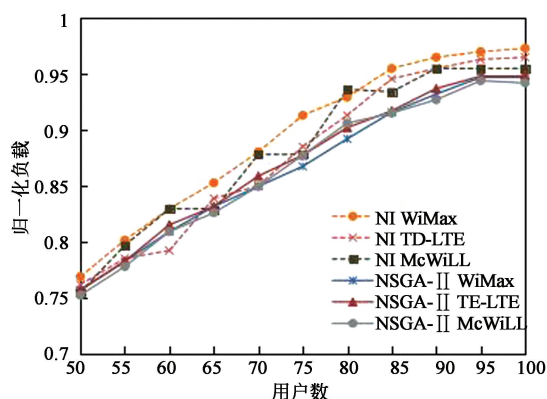
Fig.3 Normalized load of the proposed algorithm

下面进一步将本文所提算法与其他两种算法的归一化负载进行对比。如图4(a)所示,本文算法与MOC算法的网络负载率均随着用户数的增加而增加,且各网络负载曲线比较集中,表明网络间保持较均衡的状态,因为两种算法都将网络间的负载方差最小化作为优化目标,使各用户均衡地接入到各个网络,较好地实现了负载均衡;同时,可看出MOC算法的负载率稍低于本文算法,因为MOC算法将占用最少资源作为优化目标之一。图4(b)给出了本文算法与基于NI算法的负载对比,如图所示,NI方法在不同用户数下各曲线较为松散,网络间负载差距较大,且负载率相比本文算法大,因为NI方法将传输速率最大化作为唯一目标,始终选择使传输速率最大化的接入网络,而忽视了网络间的负载均衡。



(a) 与 MOC 算法对比

(a) Comparison with MOC algorithm



(b) 与 NI 算法对比

(b) Comparison with NI algorithm

图4 归一化负载对比

Fig.4 Normalized load comparison

4.2.2 传输速率对比

图5比较了算法在不同接入用户数下的传输速率。如图所示,3种算法在接入用户数小于85时,系统信息传输速率与用户数呈线性增长关系,在大于85时,传输速率增长平缓而趋于稳定。同时,由于MOC算法没有考虑传输速率,其各用户数下的传输速率均明显低于其它两种算法。本文算法与NI算法都将传输速率最大化作为优化目标之一,令用户接入信道条件较好的网络,取得了较高的传输速率。

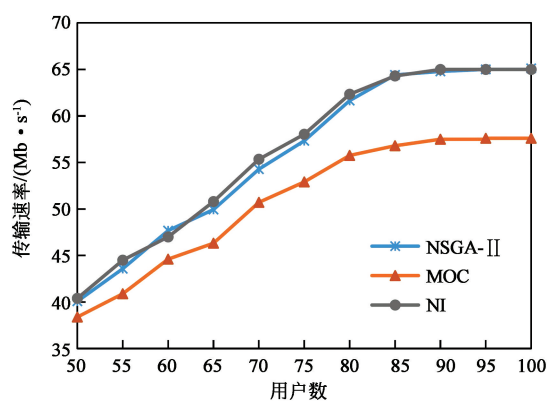


图5 传输速率对比

Fig.5 Transmission rate comparison

由上述实验可知,采用本文提出的基于NSGA-II算法的业务接入控制策略,在保持网络间负载均衡的情况下,获得了较高的传输速率,显示出本文所提方法的有效性。

5 结 论

本文针对异构网络多用户多业务共存环境下,用户期望接入最优网络以获取最大的信息传输速率,导致网络负载不均衡的问题,构建了信息传输速率最大化及网络负载最均衡的双目标优化模型,并基于NSGA-II多目标优化算法求解该复杂的业务接入问题。实验结果表明,与已有的网络接入及资源分配方法相比,本文算法兼顾了用户的传输速率需求及系统间的负载均衡问题,在用户的QoS需求及网络系统性能间取得较好的均衡,具有一定的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] KOLIPAKA S , BHANDARI B N , DEY A. Joint admission control and vertical handoff between WLAN and WIMAX in wireless mesh networks for QoS [C]// *IEEE International Conference on Engineering & Technology*. IEEE, 2016.
- [2] FERRUS R, SALIENT O , AGUSTI R. Interworking in heterogeneous wireless networks: Comprehensive framework and future trends [J]. *Wireless Communications IEEE*, 2010, 17(2):22-31.
- [3] 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.
- [4] COUTINHO R W L, COELHO V L, COSTA J C W A, *et al*. Optimal policy for joint call admission control in next generation wireless networks[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Network and Service Management, CNSM 2010*, Niagara Falls, Canada, 2010. IEEE, 2010.
- [5] 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 J, LI J D, LIU X Y. Joint network selection strategy in heterogeneous wireless networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(2):407-413. (in Chinese)
- [6] ZHANG W, KWAK K S, FENG C. Network selection algorithm for heterogeneous wireless networks based on multi-objective discrete particle swarm optimization [J]. *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, 2012, 6(7): 1802-1814.
- [7] 俞鹤伟,梁根,秦勇.异构无线网络多链路接入动态资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4):817-824.
YU H W, LIANG G, QING Y. Multiple link access and dynamic resource allocation algorithm in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4):817-824. (in Chinese)
- [8] 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 M X, CHEN S Z, XIE D L, *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. (in Chinese)
- [9] 黄河清,沈杰,马奎,等. 无线传感网基于梯度的非均匀分簇[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8):2053-2059.
HUANG H Q, SHEN J, MA K, *et al*. Grade-based unequal clustering for wireless sensor networks [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8):2053-2059. (in Chinese)
- [10] 盛洁,马冬. 异构无线网络业务接入多目标优化控制算法[J]. 电子学报, 2016, 44(2):282-288.
SHENG J, MA D. Multi-objective optimal based service access control algorithm for heterogeneous wireless networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(2):282-288. (in Chinese)
- [11] 毕晓君,张倩. 基于分解的多目标进化算法的异构无线网络业务接入控制[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 778-784.
BI X J, ZHANG Q. Service access control for heterogeneous wireless networks based on multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 778-784. (in Chinese)
- [12] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. *IEEE Trans Commun*, 1997, 45(12):1613-1621.
- [13] BUTALA P , ELGALA H , LITTLE T D C . Sample indexed spatial orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9):10-14.
- [14] 孙卓,刘铁军,张倩倩,等.异构无线分组网络中的接入选择机制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10):2762-2769.
SUN Z, LIU T J, ZHANG Q Q, *et al*. Radio access selection algorithm in heterogeneous wireless packet networks [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(10) : 2762-2769. (in Chinese)
- [15] 石文孝,范绍帅,王楠,等. 基于模糊神经网络的异构无线网络接入选择算法[J]. 通信学报, 2010, 31(9).
SHI W X, FAN S S, WANG N, XIA C J. Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless networks [J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(9). (in Chinese)

[16] 温斌,林波,刘昀,等.McWiLL 宽带无线接入技术及应用[M].北京:人民邮电出版社,2009.

WEN B, LIN B, LIU Y, *et al.* McWiLL broadband wireless access technology and application[M]. *Beijin: Posts and Telecommunications Press*, 2009. (in Chinese)

作者简介:



董晓庆(1982—),男,广东潮州人,博士研究生,副教授,2008年于广东工业大学获得硕士学位,主要从事无线通信、图像处理方面的研究。E-mail: dxqzq110@163.com



谢森林(1982—),男,广东潮州人,硕士,讲师,2008年于广东工业大学获得硕士学位,主要从事无线通信、自动控制方面的研究。E-mail: senlinxie@163.com