



基于用户体验质量和系统能耗的异构网络 联合接入选择和功率分配策略

季石宇¹, 唐良瑞¹, 李淑贤¹, 杜施默²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 中国移动通信集团浙江有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310006)

摘要: 为了解决无线网络能耗和用户体验质量的问题, 提出了一种应用于异构无线网络环境的基于多目标优化的联合接入选择和功率分配策略。该策略以最小化系统整体能耗和最大化用户平均体验质量为目标, 建立了多目标优化联合分配模型, 通过差分进化算法得到联合分配模型的最优解集, 并结合 TOPSIS 的方法从最优解集中得到折中的联合分配方案。仿真结果表明, 本文所提的策略能够有效地降低系统能耗, 并提升用户整体的服务体验。

关键词: 异构网络; 用户体验质量; 能耗; 接入选择; 功率分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017251

Joint user association and power control scheme based on energy consumption and QoE in heterogeneous network

Ji Shiyu¹, TANG Liangrui¹, LI Shuxian¹, DU Shimo²

1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. Hangzhou Branch of China Mobile Group Zhejiang Co., Ltd., Hangzhou 310006, China

Abstract: Based on multi-objective optimization, a joint user association and power control scheme was proposed in heterogeneous network environment, aiming to reduce the system energy consumption and improve user quality of experience. The scheme took the system energy consumption minimum and the average user quality of experience maximum as objective functions and translated the joint user association and power control to multi-objective problem. Then, the differential evolution optimization algorithm and TOPSIS algorithm was used to solve the multi-objective problem. Simulation results show that the scheme can efficiently reduce the system energy consumption and improve the user quality of experience.

Key words: heterogeneous network, user quality of experience, energy consumption, user association, power control

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-08-21

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No.4142049); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No.2014AA01A701); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2015XS07)

Foundation Items: Beijing Natural Science Foundation of China (No.4142049), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01A701), The Central University Basic Business Expenses Special Funding for Scientific Research Projects (No.2015XS07)



1 引言

未来无线网络呈现出泛在化、扁平化的特性,将不再是由单一的接入网络构成,而是包含宏蜂窝网络、微蜂窝网络等多种形式、多种技术和能耗开销的异构蜂窝网络^[1,2]。异构蜂窝网络的出现能为用户提供更为充裕的资源,从而有效地保证用户的服务质量^[3,4]。但是由于无线终端设备的增多、终端类型的日益丰富,用户已经不满足于保证自身的服务质量,而更加追求提升自身的体验质量(quality of experience, QoE)^[5]。另一方面,由于温室气体的排放、煤炭等不可再生资源使用的加剧,系统能耗也是人们关注的另一个重点^[6]。异构网络的资源管理能够很好地解决用户体验提升和系统能耗降低的问题。

目前,对于异构无线网络中的资源管理已有广泛研究,参考文献[7]提出了信干噪比最大化(signal to interference plus noise ratio maximization, SINRmax)的接入方案,即用户接入信干噪比最强的网络中。参考文献[8]提出了基于负载均衡的接入选择(radio access selection, RAS),用户根据网络的负载状况和自身的服务质量(quality of service, QoS)需求,从而决定接入最优的网络之中。参考文献[9]为了降低用户干扰,提出了集中式的功率控制策略。但是上述所提的这些策略都是对单一的无线资源(如功率)进行优化和管理,并且由于现有网络资源维度的多样性,单一资源的优化难以实现网络能耗和用户体验质量的最优化。因此,越来越多的学者进一步地研究异构网络联合资源优化^[10-13]。参考文献[10]提出了在保证用户 QoS 的条件下对网络能耗的降低,但是所提的策略是基于频谱分段的情况下,即用户传输过程中不会受到同频信号的干扰,但会大大降低无线网络频谱的利用率。参考文献[11]提出了在频谱共享下联合功率和接入的方法最小化上行传输功率总和,但是系统能耗并不仅仅包

括上行传输能耗,还包括基站处理等能耗。参考文献[12]提出了基于能效最大化的联合用户接入和功率控制(EEUA)的策略,通过将功率分配和接入选择问题转变为非线性混合整数优化问题,并通过迭代算法得到问题的最优解。但是并未考虑到由于未来无线用户将会使用各类应用和业务,用户的体验质量也是十分重要的^[14-17]。参考文献[14]提出了一种用户服务体验质量模型,但是并未考虑到在实时无线系统中,模型参数难以实时获取。为此,参考文献[15]提出了在实时无线系统中的用户体验质量模型,并设计了以提升用户体验质量为目标资源管理方案。但是这些文献单一地从能耗或者用户体验质量方面进行优化,并未综合考虑用户体验质量、系统能耗以及用户接入和功率分配等问题,这样往往会造成另一个目标的劣化,从而难以得到一个较为满意的折中解。

基于以上分析,本文提出了基于多目标的接入选择和功率分配联合优化策略(multi-objective based joint user association and power control scheme, MUPS)。通过分析无线网络系统能耗成因,从用户侧和网络侧共同建立了系统能耗模型,并结合用户体验质量提升的需求,提出了系统能耗最小、用户体验质量最大化的多目标优化模型,通过多目标差分算法进行求解,并结合逼近理想解的排序方法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)得到最优的接入选择和功率分配方案。仿真结果表明,该策略能够有效地降低系统能耗,并提升用户整体的体验质量。

2 系统模型

在异构网络环境下,当用户发出接入请求时,将会触发网络接入选择机制,网络控制中心将给各个用户分配相应的网络保证用户的接入,假设无线用户在异构无线网络重叠覆盖范围内

随机分布。系统模型如图 1 所示，重叠覆盖范围内共有 M 个网络，每个网络的总带宽为 B 。当用户 n 接入网络 m 中，则 $a_{mn} = 1$ ，否则 $a_{mn} = 0$ 。

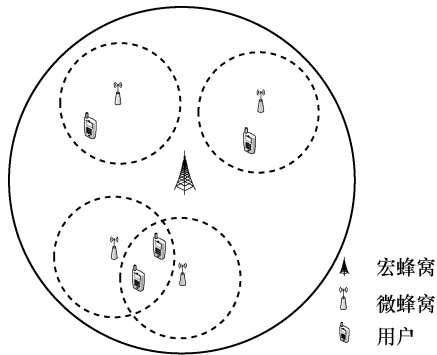


图 1 系统模型

当无线用户接入网络后，网络将会给用户分配业务传输时隙，从而保证无线用户传输业务，而当用户传输业务时，无线用户对于网络所提供的业务传输等服务存在着主观上的体验差异性，即具有不同的服务满意程度。相较于传统的服务质量，用户的体验质量进一步地引入了用户的主观感受所带来的影响。对于用户的体验质量，国际标准组织采用了平均评价分数（mean opinion score, MOS）模型作为评价模型。MOS 模型是一种主观评价模型，能够最直观地体现用户感受。它将用户感受分为 4 段，各段的统计意义见表 1^[18]。

表 1 MOS 数值与用户感受对应关系

MOS 区间	用户感受
[1,2)	十分不满意
[2,3)	不满意
[3,4)	满意
[4,5]	十分满意

通常对于无线用户，用户的体验质量是与用户的主观感受相一致的，而无线网络的传输速率与用户的主观感受息息相关，当用户的传输速率较高时，其体验质量也会提升，但是用户速率达到一定值后，用户的体验质量并不会增加；同样地，当用户的传输速率低于门限值时，由于用户

难以达到自身服务的需求，其体验质量将会是最低的，即十分不满意网络所提供的服务。本文通过参考文献[18]所提的效用函数来表示用户的体验质量，即对于无线用户 n ，其体验质量为：

$$MOS_n = \begin{cases} 1, & R < R_{\min} \\ a \ln(R_n / b), & R_{\min} \leq R \leq R_{\max} \\ 4.5, & R_{\max} < R \end{cases} \quad (1)$$

其中， R_n 为用户 n 的传输速率， $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 分别是最小传输速率和最大传输速率。 a 和 b 为固定变量，保证所提的用户体验函数为连续函数。

3 多目标接入选择及功率分配联合优化策略

在无线网络中，用户十分关心自身的体验质量，但是整个无线系统更关心整个网络的能耗和终端能耗，从而能够达到节能和降低成本的目的。因此本文从网络侧和用户侧分别建立了能耗目标，同时考虑了用户体验质量的最优化，从而将用户的接入选择和功率分配问题转变为多目标优化问题，并采用多目标优化的算法对优化问题进行求解得到最优的接入选择和功率分配方案，并通过采用 TOPSIS 的方法对系统能耗和用户体验质量做出很好的折中。

3.1 多维联合优化模型

3.1.1 最小化能耗

整个无线通信系统中，不仅基站会消耗大量的能量，并且随着终端数目的增多，终端能耗也日益成为系统能耗的重要组成部分。无线网络基站能耗主要包括无线传输能耗、信号处理能耗和固定的电路能耗，计算式为：

$$E_B = \int_0^t \left(\sum_{m=1}^M (\varepsilon_m p_m(\tau) + p_m^c(\tau)) + \sum_{m=1}^M p_m^b(\tau) \right) d\tau \quad (2)$$

其中， ε_m 为网络 m 的天线增益， $p_m(\tau)$ 为网络 m 在第 τ 时刻无线网络的传输功率， $p_m^c(\tau)$ 和 $p_m^b(\tau)$ 分别为网络 m 的导频功耗和固定功耗。

用户侧的能耗主要包括两个部分，一部分是由用户终端信号处理所带来的能耗，另一部分是



终端固定能耗。终端处理能耗不仅和处理时间有关，还与信号处理功率有关^[19]，而由于终端始终保持开启状态，其固定能耗则是在整个时隙中所消耗的能量，计算式为：

$$E_U = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \int_0^{t_n'} (a_{mn} p_n^S(\tau)) d\tau + \int_0^{t_n'} \left(\sum_{n=1}^N p_n^I(\tau) \right) d\tau \quad (3)$$

其中， $p_n^S(\tau)$ 为用户在第 τ 时刻的信号处理功率， $p_n^I(\tau)$ 为用户 n 的固定功耗。 t_n' 为用户 n 的信号处理时间，对于用户 n ，其接入网络后与网络中所有用户共用时隙，其信号处理的时间为：

$$t_n' = \sum_{m=1}^M \left(a_{mn} t / \sum_{j=1}^N a_{mj} \right) \quad (4)$$

整个系统的能量消耗应当包括网络侧的能量消耗和终端的能量消耗：

$$E = E_B + E_U \quad (5)$$

考虑到在所建立的网络场景下，用户并不存在高速移动，这就使得在整个时隙内无线网络和无线终端的信号处理功率、发射功率等几乎不发生变化，因此整个系统的能耗最小化的目标可以转变为整个系统功耗的最小：

$$f_1(a, p) = \min(P_B + P_U) \quad (6)$$

其中， P_B 为网络功耗，包括固定功耗和传输功耗。 P_U 为用户功耗，包括接收信息的处理功耗和固定功耗。具体的计算方式分别为：

$$P_B = \sum_{m=1}^M (\varepsilon_m p_m + p_m^c) + \sum_{m=1}^M p_m^b \quad (7)$$

$$P_U = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} p_n^S \left(\sum_{m=1}^M \left(a_{mn} / \sum_{j=1}^N a_{mj} \right) \right) + \sum_{n=1}^N p_n^I \quad (8)$$

其中， p_m 为在传输时隙内基站发射功率的均值， p_m^b 为基站固定功耗， p_n^S 和 p_n^I 分别为用户接收信息的处理功耗和用户设备的固定功耗。

3.1.2 最大化用户平均体验质量

无线网络联合优化策略的另一个目标是实现无线用户的平均体验质量最大化：

$$f_2(a, p) = \max \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N MOS_n \quad (9)$$

其中， MOS_n 为用户 n 的体验质量，可以通过式 (1) 进行计算，通过式 (1) 可以看出，用户 n 的体验质量仅仅与用户 n 的传输速率有关，对于用户 n 而言，其传输速率为：

$$R_n = \sum_{m=1}^M \frac{B}{\sum_{n=1}^N a_{mn}} \log(1 + \gamma_{mn}) \quad (10)$$

其中， γ_{mn} 为用户 n 接入网络 m 后的信噪比，计算式为：

$$\gamma_{mn} = \frac{p_m g_{mn}}{\sum_{j \in S} p_j g_{jn} + N_0 B} \quad (11)$$

其中， g_{mn} 为网络 m 与用户 n 之间的信道增益， N_0 为高斯白噪声密度。

3.1.3 约束条件

无线系统中由于用户需求和基站性能等会对联合优化造成影响，主要包括系统发射功率的约束，用户接入和 QoS 约束。

(1) 发射功率约束

在实际无线网络中，第 m 个无线网络可用的传输功率是有限的，记为 $p_{m\max}$ ，最大传输功率的限制是为了保证基站设备能够处于线性工作区间，从而保证基站设备的良好运行，因此发射功率的约束为：

$$p_m \leq p_{m\max}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (12)$$

(2) 用户接入约束

在无线网络中，每个用户在同一时刻最多只能接入一个无线接入网络中，即：

$$a_{mn}(a_{mn} - 1) = 0, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \quad (13)$$

(3) QoS 约束

用户接收到的信噪比应该满足自身约束的需求，从而满足自身最低的服务质量需求，即：

$$\sum_{m=1}^M a_{mn} \gamma_{mn} \geq \gamma_{\text{req}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (14)$$

3.2 多目标差分进化算法

综上所述, 本文从网络能耗和用户体验两个方面对异构网络下的接入选择进行研究, 其目的是能够降低网络能耗和提升用户体验质量, 因此对于异构网络接入选择问题可以转变为多目标优化的问题:

$$\begin{aligned} & \min f_1(a, p), \max f_2(a, p) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} p_m \leq p_{\max}, \forall m \in \mathcal{M} \\ a_{mn}(a_{mn} - 1) = 0, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \\ \sum_{m=1}^M a_{mn} \gamma_{mn} \geq \gamma_{\text{req}}, \forall n \in \mathcal{N} \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $f_1(a, p)$ 和 $f_2(a, p)$ 为联合分配算法的优化目标。考虑到所提的多目标优化问题的解空间集为无穷解集, 并且所提的优化目标的一阶导函数非连续, 因此优化问题难以通过将其转化为凸优化问题进行求解。所以采用多目标差分进化算法实现对多目标问题的优化求解^[20]。差分进化算法是一种随机的并行直接全局搜索算法, 具有简单易用和全局寻优能力强等优点, 已广泛用于单目标优化问题和多目标优化问题的求解。

(1) 种群初始化

假设初始化种群为 $X^t = (x_1^t, x_2^t, \dots, x_N^t)$, 其中, N 为种群规模, 种群中每个个体都是一组优化变量, 即包括接入方式和功率分配方式的优化变量。初始化迭代次数 $t = 0$, 其中接入方式为离散型变量而功率分配方式为连续型变量。因此本文采用混合编码的方式对每个个体进行编码。

$$x_i = \{\overbrace{b_1, b_2, \dots, b_n, \dots, b_N}^{\text{整数}}, \overbrace{p_1, p_2, \dots, p_m, \dots, p_M}^{\text{实数}}\} \quad (16)$$

其中, P_m 为网络 m 的传输功率, b_n 为用户 n 所接入的网络, 可以通过式 (17) 进行计算:

$$b_n = \sum_{m=1}^M (ma_{mn}) \quad (17)$$

(2) 变异

变异操作是通过对种群个体的接入方式和功

率分配方式的变异, 从而扩大搜索空间, 避免陷入局部陷阱的方式, 具体可表示为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + R \cdot (x_{r_1}^t - x_{r_2}^t) \quad (18)$$

其中, R 为变异常量, 通常表示的是前次迭代个体对下次迭代个体的影响程度。 x_i^t 和 x_i^{t+1} 分别为变异前和变异后的种群个体, $x_{r_1}^t - x_{r_2}^t$ 为当代个体的差分向量, 其中 $r_1 \neq r_2$ 。对于整个变异操作, 如果超出上下限范围则取边界值。由于本文的编码方式为混合编码方式, 当种群个体的优化变量为整数时, 需要对变异产生的值进行取整:

$$x_i^{t+1} = \lceil x_i^t + R \cdot (x_{r_1}^t - x_{r_2}^t) \rceil \quad (19)$$

其中, 符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整函数。

(3) 交叉

为了保证种群的多样性, 采用二项式交叉算子对前后两代的种群个体进行交叉, 从而保证前代个体的分量能够被继承。具体方式为:

$$v_{ij}^{t+1} = \begin{cases} x_{ij}^t, \text{rand}(\cdot) > C_r \\ x_{ij}^{t+1}, \text{rand}(\cdot) \leq C_r \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\text{rand}(\cdot)$ 为在 $[0, 1]$ 中产生的随机数, C_r 为交叉概率。所得的 v_{ij}^{t+1} 为 $(t+1)$ 代种群中第 i 个个体 v_i^{t+1} 的第 j 个优化变量。

(4) 选择

本文采用参考文献[20]所提出的选择策略来求解含有约束条件的多目标优化问题。通过计算所有种群个体的目标函数值, 比较变异交叉后产生的 $(t+1)$ 代个体与 t 代个体的目标值大小, 若 $(t+1)$ 代个体 v_i^{t+1} 支配 t 代个体 x_i^t , 则 v_i^{t+1} 进入种群 X^{t+1} , 否则 x_i^t 进入种群 X^{t+1} 。个体 v_i^{t+1} 支配个体 x_i^t 指的是满足式 (21):

$$f_i(x_i^t) \prec f_i(v_i^{t+1}), i = 1, 2, \dots, r \quad (21)$$

其中, $f_i(\cdot)$ 为优化目标函数, $\prec$ 表示左边劣于右边, 当目标函数为最大化目标时, 即表示小于, 否则表示大于。 r 是优化目标函数的个数。



(5) 最优折中解的选取

通过上述步骤可以得到多目标问题下的最优解集,即 Pareto 解集。在实际的网络中,用户最终的接入方案和功率分配方案需要能从 Pareto 解集中选择出最优的折中解,即需要均衡系统能耗和用户体验质量的最优联合分配方案^[21]。本文采用 TOPSIS 的方法实现对系统能耗和用户体验质量的有效折中,即通过计算式 (22) 得到 Pareto 解集中各个联合用户接入和功率分配方案的最优解:

$$D_k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^r (Y_{ki} - Y_i^-)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^r (Y_{ki} - Y_i^-)^2 + \sum_{i=1}^r (Y_{ki} - Y_i^+)^2}} \quad (22)$$

其中, Y_{ki} 为 Pareto 解集中第 k 个解的第 i 个目标函数归一化值, Y_i^+ 和 Y_i^- 分别为 Pareto 前沿中所有个体的第 i 个目标函数归一化值的最大值和最小值。目标函数的归一化值通过式 (23) 计算:

$$Y_{ki} = \frac{H_{ki}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K H_{ki}^2}} \quad (23)$$

其中, H_{ki} 为 Pareto 解集中第 k 个解的第 i 个目标函数值, K 为 Pareto 前沿中的个体总数。根据 TOPSIS 方式所得到的 D_k 值在 0~1 范围内,根据 D_k 值大小对所得的 Pareto 前沿解集进行排序, D_k 值越大,说明所得的联合分配方案越接近于最优方案,反之,则远离最优方案。最终,根据排序结果得到最终的联合分配方案。

4 仿真分析

为了验证 MUPS 算法的性能,本文对 MUPS 算法与 EEUA 和 SINRmax 进行仿真对比分析。采用异构多接入网络组网的方式,仿真模型如图 1 所示,其中,宏蜂窝的信道衰落为 $10\lg\theta = 128.1 + 37.6\lg d$,微蜂窝网络的信道衰落为 $10\lg\theta = 140.7 + 36.7\lg d$ ^[22],具体的相关参数见表 2^[12,19]。

表 2 具体的相关参数

仿真参数	宏蜂窝	微蜂窝
总带宽/MHz	10	10
天线增益	2	2
最大发射功率/dBm	43	33
覆盖半径/m	500	50
用户接收信号处理功率/mW	5~30	
高斯白噪声密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174	

4.1 收敛性分析

算法收敛性分析如图 2 所示。由图 2 可知,随着迭代次数的增多,系统能耗不断降低,而用户平均体验质量将不断提升,这是由于算法将交叉变异后的个体与原来的个体进行比较,选择出优秀个体进入下次迭代,从而保证了后代个体的优质性。而当迭代次数为 45 次左右时,算法达到收敛,系统能耗和用户平均体验质量不再变换。

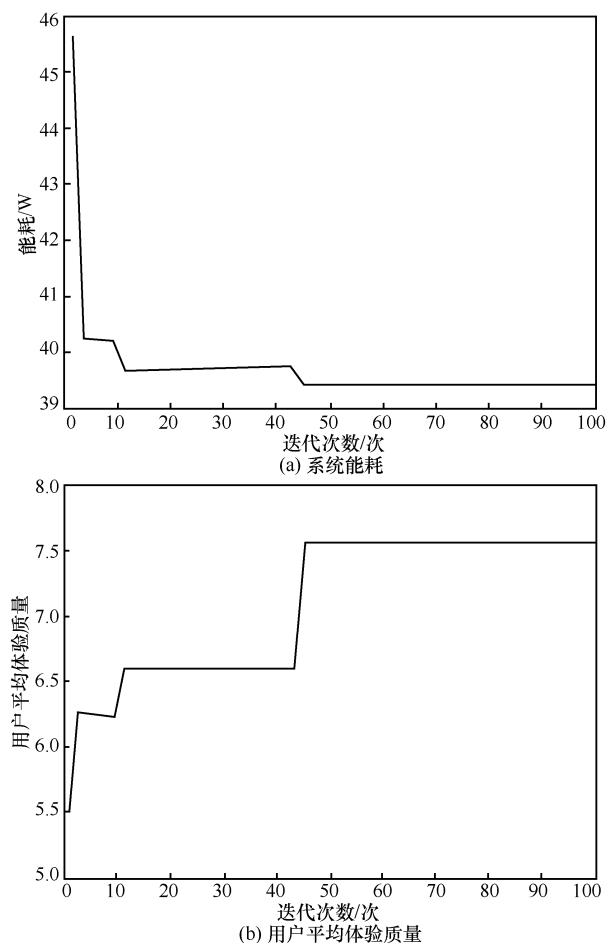


图 2 算法收敛性分析

4.2 系统能耗分析

3 类不同算法的系统整体功耗如图 3 所示。由图 3 可知,随着用户数的增加,3 类算法的功耗几乎并没有产生变化,尤其是 SINRmax。这是由于 SINRmax 算法中并没有对各个网络的发射功率进行优化,即都采用最大功率进行传输,因此在网络侧的功耗并不会随着用户的增多而发生变化。此外,对于用户侧的功耗而言,从式(8)可以看出,由于可接入网络数目的限制,尽管用户数目有明显增多,但是仍然难以造成用户侧功耗的提升。而其他两类算法都可以对发射功率进行分配,但是由于用户位置的随机性和不确定性,网络的发射功率仍然难以随着用户的变化而变化。本文所提出的 MUPS 算法的功耗在所有算法中是最低的,这是由于 MUPS 算法直接以能耗为目标,相较于 EEUA 算法是以能效为目标,能够有效实现能耗的降低。

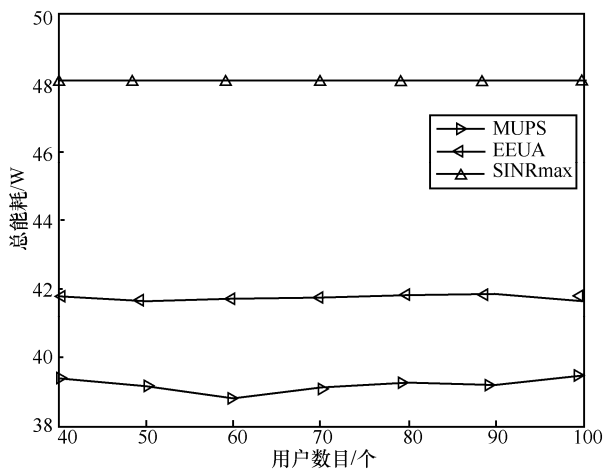


图3 3类不同算法的系统整体功耗

4.3 用户体验质量分析

3 种算法的用户平均体验质量情况如图 4 所示。由于无线网络资源有限,随着用户数目的增多,用户难以获得充足的网络资源,因此用户平均体验质量将会降低。由图 4 可以看出,当用户数为 40 时,SINRmax 的平均用户体验要高于其他两类算法,但是随着用户数的增多,SINRmax 算

法中的用户体验将快速下降,当用户数分别为 50 和 60 时将开始低于 MUPS 算法和 EEUA 算法。这是由于在网络中用户数较少时,网络中干扰信道数较少,网络传输功率的最大化能够提升用户体验,但是随着用户数增多,网络之间的相互干扰将会更加严重,传输功率的最大化将会严重地劣化用户体验,从而造成用户体验质量的急速下降。相比于 SINRmax 算法,MUPS 算法和 EEUA 算法的下降速率相对缓慢,但是由于 EEUA 算法是考虑网络传输容量,并未直接考虑用户体验质量,因此其用户平均体验质量始终低于 MUPS 算法。

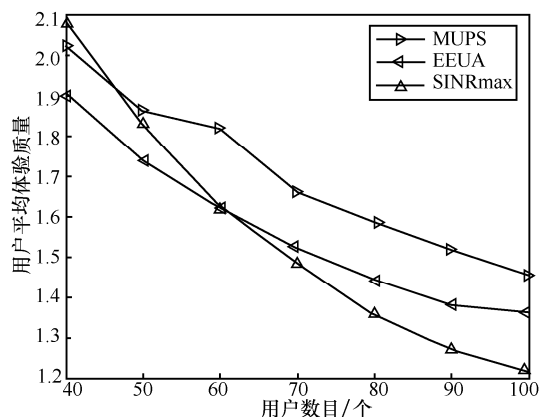
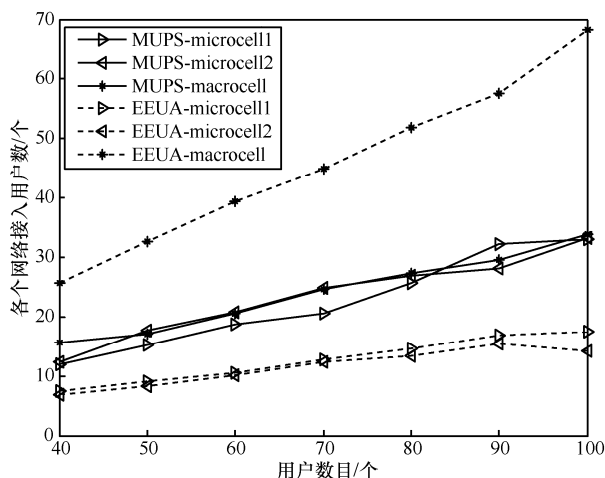


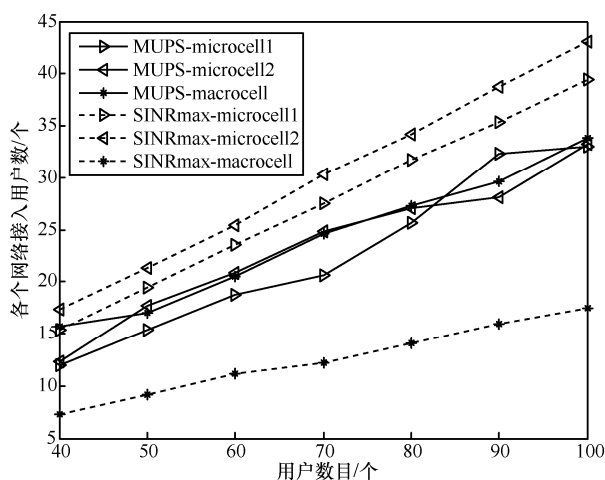
图4 用户平均体验质量情况

4.4 负载情况分析

MUPS 算法的各个网络负载情况与 EEUA 算法和 SINRmax 算法的对比情况如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着用户数增多,MUPS 算法的宏蜂窝和两个微蜂窝的负载水平十分接近,呈现出了更好的均衡性,这是由于 MUPS 算法能够有效地折中平均用户体验和系统能耗,从而能够使得用户均衡地接入各个网络之中。在 SINRmax 算法中,由于微蜂窝覆盖范围较小,用户大多能够从微蜂窝处接收到更强的信号,因此,微蜂窝中的接入用户数明显高于宏蜂窝的用户数。而在 EEUA 算法中由于传输功率和信道状态的影响,接入宏蜂窝网络的用户数将会大于微蜂窝网络的用户数。



(a) MUPS算法与EEUA算法的对比



(b) MUPS算法与SINRmax算法的对比

图5 网络负载情况对比

5 结束语

本文针对无线网络能耗和用户体验问题提出了一种基于多目标优化的联合接入选择和功率分配算法。从用户侧和网络侧建立系统能耗模型，同时也建立以用户传输速率为变量的实时传输系统的用户体验质量模型。并在此基础上，设计了以系统能耗最大和平均用户体验最小的多目标优化问题，通过采用差分进化方法对多目标优化问题进行求解，得到最优的接入选择和功率分配 Pareto 解集，通过 TOPSIS 方法，从解集中得到最优的折中解。仿真结果表明，本文所提的算法能够有效地降低系统能耗，并提升平均用户体验质量，同时也能够保证网络的负载均衡性，具有较

好的应用价值。

参考文献:

- [1] XU C, JIN W, ZHAO G, et al. A Novel multipath-transmission supported software defined wireless network architecture[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 2111-2125.
- [2] NIU C, LI Y, HU R Q, et al. Fast and efficient radio resource allocation in dynamic ultra-dense heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 1911-1924.
- [3] 田峰, 刘翰焘, 周亮. 分层异构网络无线资源管理技术探讨[J]. 电信科学, 2013, 29(6): 32-38.
TIAN F, LIU H T, ZHOU L. Research on radio resource management for hierarchical heterogeneous wireless network[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(6): 32-38.
- [4] 梁潇, 钱志鸿, 田洪亮, 等. 基于马尔可夫决策模型的异构无线网络切换选择算法[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 206-214.
LIANG X, QIAN Z H, TIAN H L, et al. Markov decision model based handoff selection algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. Acta Mathematica Scientia, 2016, 65(23): 206-214.
- [5] CASAS P, SEUFERT M, WAMSER F, et al. Next to you: monitoring quality of experience in cellular networks from the end-devices[J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2016, 13(2): 181-196.
- [6] 张英杰, 章兢, 刘文强, 等. 通信行业能耗现状分析与节能战略思考[J]. 电信科学, 2011, 27(10): 103-109.
ZHANG Y J, ZHANG J, LIU W Q, et al. Overview of current state of energy consumption and energy-saving strategies exploration in communication industry[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(10): 103-109.
- [7] SEKULOVIC N, STEFANOVIC M, DENIC D, et al. Performance analysis of signal-to-interference-plus-noise ratio-based selection diversity over correlated rayleigh fading channels[J]. IET Communications, 2011, 5(2): 127-134.
- [8] 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): 2762-2765.
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): 2762-2761.
- [9] TAI M H, TRAN N H, DO C T, et al. Power control for interference management and QoS guarantee in heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1402-1405.
- [10] HUANG G, LIN Z, TANG D, et al. QoS-driven jointly optimal power and bandwidth allocation for heterogeneous wireless networks[J]. Electronics Letters, 2014, 51(1): 122-124.
- [11] CHITTI K, QUAN K, SPEIDEL J. Joint base station association and power allocation for uplink sum-rate maximization[C]//Signal Processing Advances in Wireless Communications, June 16-19, 2013, Darmstadt, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013:

- 6-10.
- [12] ZHOU T, HUANG Y, YANG L. Energy-efficient user association in downlink heterogeneous cellular networks[J]. IET Communications, 2016, 10(13): 1553-1561.
- [13] 于佳, 王野, 吴绍华, 等. 基于 CoMP 传输的分布式异构网络资源分配[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 11-19.
YU J, WANG Y, WU S H, et al. Resource allocation of distributed heterogeneous network based on CoMP transmission[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 11-19.
- [14] YUAN D, SONG M, TENG Y, et al. QoE-oriented resource allocation for multiuser-multiservice femtocell networks[J]. China Communications, 2015, 12(10): 27-41.
- [15] CHEN F, QIN X, WEI G. QoE optimized resource allocation in multiuser OFDM systems[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(7): 328-331.
- [16] WANG N, GONG S, FEI Z, et al. A QoE-based jointly subcarrier and power allocation for multiuser multiservice networks[J]. Science China, 2016, 59(12): 1-13.
- [17] 杨燕. 浅析移动通信网络中的 QoE[J]. 电信科学, 2007, 23(8): 34-38.
YANG Y. Simple analysis of QoE in mobile communication network[J]. Telecommunications Science, 2007, 23(8): 34-38.
- [18] 王大鸣, 陈松, 崔维嘉, 等. 多用户 MIMO-OFDM 系统基于 QoE 效用函数的跨层资源分配[J]. 通信学报, 2014, 35(9): 175-183.
WANG D M, CHEN S, CUI W J, et al. QoE utility function-based cross-layer resource allocation in multi-user MIMO-OFDM systems[J]. Journal on Communications, 2014, 35(9): 175-183.
- [19] WU Q, CHEN W, TAO M, et al. Resource allocation for joint transmitter and receiver energy efficiency maximization in downlink OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 416-430.
- [20] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
LIU W Y, WEN J, XIE C, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.

- [21] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 51-57
SHENG S Q, FAN L T, LI X, et al. Multi-objective planning of distribution network based on pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 51-57
- [22] LIU Y, LU L, LI G Y, et al. Joint user association and spectrum allocation for small cell networks with wireless backhauls[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 496-499.

[作者简介]



季石宇 (1992-), 男, 华北电力大学电气与电子工程学院博士生, 主要研究方向为无线资源管理技术。



唐良瑞 (1966-), 男, 华北电力大学电气与电子工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、电力系统通信与信息处理。



李淑贤 (1992-), 女, 华北电力大学电气与电子工程学院硕士生, 主要研究方向为移动通信技术。



杜施默 (1992-), 女, 中国移动通信集团浙江有限公司杭州分公司网络工程师, 主要研究方向为通信网络流量建模。