

# 多网络接入协同选择与聚合算法

刘 斌<sup>1,2</sup> 朱 琦<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003;

2. 南京邮电大学教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 江苏南京 210003)

**摘 要:** 针对异构无线网络场景, 本文提出了一种基于协同学的多网络并行接入协同聚合算法, 该算法基于吞吐量、可用信道数、功耗、费用及丢包率等多个参数构建了网络协同度评价体系, 将属性要求作为协同子系统, 属于同一属性的不同参数作为子系统的序参量, 序参量之间相互协同和制约, 以更加全面地衡量聚合网络的整体性能。多网络聚合过程分为两步: 首先计算单个网络的协同度, 以判断该网络是否为参与聚合的候选网络, 多个候选网络的各种排列组合可以得到多种网络的候选方案; 候选方案采用属性聚合形成聚合网络, 然后计算聚合网络的协同度, 选择协同度最大的多网络聚合方案。仿真结果证明, 本文算法能够更加合理分配信道, 降低用户接入阻塞率, 增加用户的平均吞吐量和系统容量, 同时降低单位吞吐量对应的功耗和费用。

**关键词:** 异构网络; 多接入; 协同学; 并行传输; 网络聚合

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2017.01.004

## Multiple Networks Access Synergetic Selection and Aggregation Algorithm

LIU Bin<sup>1,2</sup> ZHU Qi<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** In this paper, we propose a parallel multi-access selection algorithm based on synergetic theory. First, Synergy degree evaluation mode is established. In the model, every candidate network is a system composed by several attribute subsystems. Subsystem is defined as a certain kind of network's expected attribute or property, while order parameters of subsystem are parameters related to this attribute. The algorithm firstly calculates the synergy degree of each single network available according to the model. The degree determine whether the network can be aggregated. The alternative multi-network schemes are formed by these networks' combination. Then, the algorithm calculates the synergy degree of each aggregated network gotten from attribute aggregation. The scheme whose synergy degree is maximal will be selected as the final decision. The simulation results show the algorithm proposed can arrange channels more reasonably, reduce block possibility of new-arrivals. Thus it can increase the users' average throughput, and reduce power consumption per bit and cost per bit as well.

**Key words:** heterogeneous network; multi-access; synergetic theory; parallel transmission; network aggregation

## 1 引言

随着以视频流媒体为代表的高速率数据业务在蜂窝网络中的大量应用, 蜂窝网络的负载急剧增加。

根据 Cisco 的预测<sup>[1]</sup>, 2013 ~ 2018 年全球移动数据流量将增加 11 倍。采用单个网络独立承载业务很难满足未来使用需求。无线网络呈现密集异构的趋势已经非常明显, 同时伴随着多模终端的出现及普及, 利

用多网络聚合方式实现异构网络并行传输成为解决带宽限制,缓解蜂窝网络负载的有效途径。

多网络并行传输中的网络选择与资源分配问题一直是通信领域研究的重点,文献[2]提出了一种分布式联合资源分配的多网络选择算法,通过优化各个接入功率分配,实现多接入系统容量的最大化;文献[3]基于排队论将业务分流策略用于多网络传输;文献[4]使用博弈论方法研究多网络中的网络选择问题;文献[5]提出了一种基于联合效用优化的多网络接入选择算法,通过建立优化多个网络的联合效用函数,选择高效用网络实现并行接入,实验证明选择多网络接入获得的吞吐量等系统性能要明显优于单网络;文献[6]提出一种基于SNR 阈值判断的多网络选择算法,通过在蜂窝网络中使用 WLAN 协同传输增加系统容量,仿真验证在分布式用户网络选择策略下,增加 SNR 测量值等信息反馈可以提高网络切换算法的性能;文献[7]将多属性决策方法(MADM: Multiple Attribute Decision Making)引入多网络接入选择,能够考虑网络的多个属性选择具有用户偏好特征的网络;文献[8]提出基于马尔科夫决策过程(MDP: Markov Decision Process)推导了两种多网络选择策略,研究突出了WLAN 分流蜂窝网络业务的重要性;文献[9]系统地研究了多网络接入问题,通过实验证明并行方多网络接入方式获得的系统性能要优于交换式多网络接入方式。

以上多网络选择接入算法研究中,多数算法考虑网络通过对接收信号强度和终端功率等阈值控制进行网络选择,仅研究多接入网络选择的其中一个阶段,决策属性较为单一,没有全面考虑网络的其他属性。文献[7]的算法虽然考虑了多个网络属性,但是仅通过简单阈值判断单个网络是否参与聚合,容易掩盖单个网络中一些较差的网络参数形成的性能“短板”,影响系统整体性能,可能引起网络选择中的“木桶效应”。

本文提出的多网络接入协同选择与聚合算法(MSAA: Multi-access Synergetic Selection and Aggregation Algorithm),该算法将协同学应用于多网络聚合的决策过程,解决多网络接入问题。构建了以有效度,耗费度,可靠性等为主要指标的协同评价体系。指标体系中将网络的吞吐量、可用信道、功耗、

费用、丢包率等多个属性作为协同子系统,属于同一属性的不同参数作为子系统的序参量,序参量之间相互协同和制约,可以更加全面衡量网络的整体性能。本文的协同多接入算法分两个阶段,首先,本文根据接收信号强度和功耗等参数判定用户的可用网络,计算可用网络的协同度,选择协同度大的单个网络作为参与网络聚合的候选网络,这些网络的排列组合形成了多种聚合网络的聚合方案;第二阶段,计算聚合网络的协同度,选择协同度最大的聚合网络进行接入。另外采用单平滑参数的二次指数平滑法对接收信号强度 RSS 瞬时值进行处理,可以有效解决因网络波动产生的切换次数增加。仿真结果证明,本文算法通过各种性能子系统协同使役,趋向于选择整体性能更好的多网络聚合方案,增加了用户平均吞吐量和系统容量,降低了单位吞吐量的功耗、接入费用和用户接入阻塞率。

本文的结构如下:第2节给出异构无线网络场景以及实现协同多网络并行传输的系统模型;第3节给出基于协同学的多网络聚合算法;第4节通过仿真验证与对比分析本文算法性能;第5节总结本文。

## 2 系统模型

如图1所示,异构网络由 UMTS, WiMAX, WLAN1, WLAN2 和 WLAN3 五个网络组成(三个 WLAN 分属于三个不同的运营商)。本文提出的算法中用户终端拥有并行多模无线网络接口,可以支持接收来自同一个业务分流到多条无线链路并行传输的数据流。而业务分流与多接入过程对于用户是透明的,多网络选择后形成聚合链路,以并行传输的方式为用户提供数据服务。

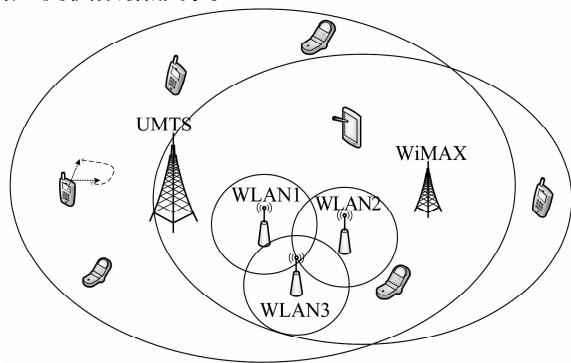


图1 异构无线网络场景

Fig. 1 Scenario of heterogeneous wireless network

本文的场景中,考虑自由空间模型下的路径损耗和阴影衰落模型<sup>[10-11]</sup>。假设在距离基站  $i$  的参考距离为  $d_0$  处的路径损耗为  $L_0$ ,则  $t$  时刻用户移动终端距离基站为  $d$  处的路径损耗  $L_i(t)$  为:

$$L_i(t) = L_i + 10n_i \lg(d/d_0) + G(\mu, \sigma) \quad (1)$$

其中  $n_i$  是路径损耗系数,与信道状态信息(CSI: Channel State Information)和基站设备参数有关,  $G(\mu, \sigma)$  为服从高斯分布的均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma$  的阴影衰落。

若基站  $i$  的固定发射功率为  $P_i^{bs}$ ,在大尺度路径损耗模型下,  $t$  时刻距离基站  $d$  处的终端收到来自基站  $i$  的接收信号强度  $RSS_i(t)$  为:

$$RSS_i(t) = P_i^{bs} - L_i(t) \quad (2)$$

基于协同学的多接入聚合模型如图 2 所示,信号接收模块和网络状态信息采集模块分别用于获取基站的信号强度和网络可用信道数、丢包率、费用等网络状态信息,信号平滑与参数处理模块采用单参数的二次指数平滑法对接收信号强度  $RSS$  瞬时值进行预处理。预处理后的  $RSS$  值和网络状态信息一起作为多接入聚合系统的决策变量。单网络协同度计算模块计算每个可用网络的协同度,体现单个网络各属性的协同程度,用于判断该网络是否为参与聚合的候选网络。参与聚合的候选网络形成多网络方案进入网络属性聚合模块进行聚合,聚合模块的输出为各个多网络聚合的候选方案。网络聚合协同度计算模块用于计算各种网络聚合方案的协同度,协同度最大的为网络聚合最优方案,网络接入执行模块依据最优方案完成对多网络方案中个网络物理连接。

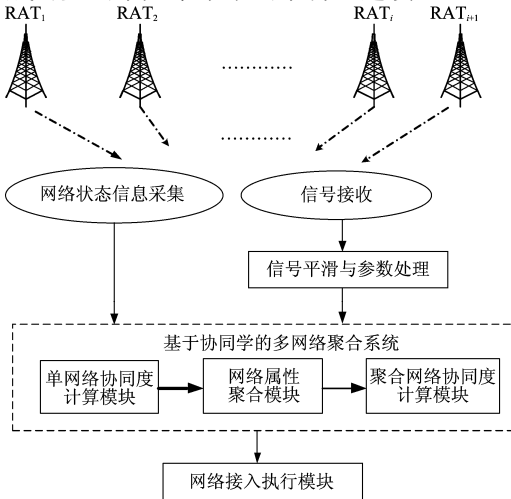


图 2 基于协同学的多接入聚合模型

### 3 基于协同学的多网络接入选择与聚合算法

#### 3.1 网络参数的获取与处理

图 1 所示的异构网络场景中,  $N$  个基站分属不同网络,基站集合定义  $\{RAT_1, RAT_2, \dots, RAT_N\}$ 。考虑终端实际使用情况,算法首先判断网络  $i$  可用条件为,终端接收到来自网络  $i$  信号强度大于终端接收信号强度阈值,并且接入基站  $i$  的功耗要小于终端功耗阈值,即判断条件为:

$$\begin{cases} RSS_i \geq RSS^{\text{low}} \\ P_i \leq P^{\text{high}} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $RSS_i$  为终端基站  $i$  的接收信号强度,  $RSS^{\text{low}}$  为终端接收信号强度阈值,  $P_i$  为终端接入网络  $i$  的功耗,  $P^{\text{high}}$  为终端功耗阈值。

若网络满足式(3),则表示该网络可用,记  $RAT_i=1$ ,否则  $RAT_i=0, i=1, 2, \dots, M$ 。只对可用网络中进行协同度计算,可以有效减少协同网络聚合过程中的计算量。

在终端当前接入的聚合网络中,只要有一个参与聚合的网络发生了变化,本文则认为终端进行了一次垂直切换。由于用户的移动性和无线网络环境的动态性,移动终端的接收信号强度  $RSS$  瞬时值变化较大,可能会导致网络选择发生波动,产生乒乓效应,造成频繁的网络切换和系统开销。由于终端移动速度变化,网络负载,信道衰减等情况变化加大  $RSS$  信号波动,而这种波动具有突发性,在一定时间间隔内对测量对象的当前瞬时值和过去测量值分别配以指数递减的平滑权重,对接收信号  $RSS$  采用二次指数平滑处理,可以有效减少突发性波动带来的影响,减少不必要的网络决策条件触发与网络切换。文献[12]采用指数平滑法来对  $RSS$  瞬时测量值进行平滑处理,证明可以有效解决瞬时值波动问题。

本文对  $RSS$  瞬时测量值使用单平滑参数的二次指数平滑法进行处理,计算公式为:

$$\begin{cases} RSS_i^{(2)}(t) = \pi * RSS_i^{(1)}(t) + (1-\pi) * RSS_i^{(2)}(t-1) \\ RSS_i^{(1)}(t) = \pi * RSS_i(t) + (1-\pi) * RSS_i^{(1)}(t-1) \end{cases}, t \geq 2 \quad (4)$$

其中  $t$  为正整数的时间序列,  $RSS_i^{(1)}(t)$  和  $RSS_i^{(2)}(t)$

分别是对来自网络  $i$  的瞬时 RSS 的一次指数平滑和二次指数平滑值,  $\pi$  为平滑指数参数且  $\pi \in (0, 1)$ 。初始时刻  $RSS_i^{(2)}(0) = RSS_i^{(1)}(0) = RSS_i^{(0)}(0) = 0$ , 并且  $RSS_i^{(2)}(1) = RSS_i^{(1)}(1) = RSS_i^{(0)}(1) = 0$ , 对 RSS 的预处理后得到的  $RSS_i^{(2)}(t)$  将用于后面的协同资源管理与决策算法中。

由香农第二定理, 终端接入网络  $i$  可以获得的吞吐量  $TO_i(t)$  为:

$$TO_i(t) = \rho_i BW_i \log_2 \left( 1 + \frac{RSS_i^{(2)}(t)}{N_o} \right) \quad (5)$$

其中  $\rho_i \in (0, 1]$  表示信息有效载荷的占比率,  $BW_i$  为无线网络  $i$  分配给单个用户接入的信道带宽,  $N_o$  为加性高斯白噪声功率。

$P_i^{ut}$  和  $P_i^{ur}$  分别为移动终端的固定发射功耗和固定接收功耗, 网络接入产生的固定功耗  $P_i^u$  为发送和接收所产生的功耗之和:

$$P_i^u = P_i^{ut} + P_i^{ur} \quad (6)$$

定义网络  $i$  基站的最小接收功率阈值为  $P_i^{br_{\min}}$ , 假定上下行信道衰减相同, 为保证数据的正常传输, 在  $t$  时刻距离基站  $d$  处的终端最小发射功率  $P_i^{s_{\min}}(t)$  应为:

$$P_i^{s_{\min}}(t) = P_i^{br_{\min}} + L_i(t) \quad (7)$$

终端在  $t$  时刻与基站  $i$  连接的实际功耗包括固定功耗与实际传输功耗<sup>[12]</sup>, 且实际传输功耗随终端最小发射功率线性增加, 线性增长系数为  $\kappa_i$ , 则有:

$$P_i(t) = P_i^u + \kappa_i P_i^{s_{\min}}(t) \quad (8)$$

### 3.2 多网络聚合算法

协同学是研究协同系统演化规律的新兴学科, 在社会学、经济学、工程应用有着广泛的应用<sup>[13]</sup>。该理论从无序到有序的现象中抽象出一整套数学模型和处理方案, 认为系统整体由子系统构成, 子系统之间的协同和制约, 影响了宏观系统上结构和功能。本文将协同学和自组织现象中的有益研究成果应用于多网络聚合算法, 将每个网络看作一个系统整体, 将可能接入网络的性能属性作为子系统, 与子系统属性相关的参数作为子系统的序参量。在网络聚合选择中, 各个属性子系统协同最好的网络才是整体性能最优的。若网络中某个属性不符合要求, 即便其他子系统即使符合要求, 但网络的整体性能会受到明显影响, 系统有序程度会下

降。多个序参量子系统中的不同序参量之间也是协同制约的关系, 单个序参量性能较低会直接影响到子系统有序度的计算值。因此, 基于协同学的网络聚合可以从子系统层和序参量层中的两个层次上全面衡量目标网络各个属性的综合性能, 避免网络选择中可能出现的“木桶效应”。

本文提出基于协同学的多网络接入协同选择与聚合算法可以根据用户具体需求和看重的属性, 灵活设计协同指标体系。在单网络聚合判断中, 算法从可用度、可靠性和耗费度三个属性子系统构建单个网络协同系统性能评价体系, 如图3所示。

对于属性子系统  $S_x$  包含的  $l$  个序参量,  $l$  维的状态向量表示:

$$\mathbf{r}_x = (r_{x1}, r_{x2}, \dots, r_{xk}, \dots, r_{xl}) \quad (9)$$

$$A_{xj} = \xi_j \frac{r_{xj} - r_{j\min}}{r_{j\max} - r_{j\min}}, j \in [1, \dots, l-1, l_x], x \in [1, 2, \dots, k] \quad (10)$$

$$A_{xj} = \xi_j \frac{r_{j\max} - r_{xj}}{r_{j\max} - r_{j\min}}, j \in [1, \dots, l-1, l_x], x \in [1, 2, \dots, k] \quad (11)$$

其中  $r_{j\max}$ ,  $r_{j\min}$  分别为单个序参量  $j$  所代表的网络属性  $\mathbf{r}_x$  的最大值和最小值, 引入  $\xi_j$  因数用来放大或缩小该序参量在所在子系统的影响。公式(10)(11)能够对各个序参量分量即网络属性进行规范化, 具体而言: 有序度子系统第  $j$  个序参量  $j \in [1, \dots, l-1, l]$  单个序参量的有序度  $A_{xj}$  计算方法, 对于取值越大网络性能越好的正效用序参量, 如吞吐量, 可用信道数等,  $r_{xj}$  用式(10)计算,  $r_{xj}$  越大分子越大, 有序度越大。反之亦然, 对于负效用的序参量, 如功耗, 费用, 丢包率采用式(11),  $r_{xj}$  越小有序度越大。通过能够对于数值含义不同的性能参数用 0 到 1 范围内的数值来统一体现, 有序度越接近 1, 越接近于用户期望。

在以往多数的协同学工程应用研究中, 使用利用动力学方程描述系统的状态过程:

$$\frac{\partial \mathbf{r}_x(\mathbf{a}, t)}{\partial t} = \mathbf{H}[\mathbf{r}_x(\mathbf{a}, t), \nabla, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{a}] + U(t) \quad (12)$$

$\frac{\partial \mathbf{r}_x(\mathbf{a}, t)}{\partial t}$  是状态向量  $\mathbf{r}_x$  关于时间  $t$  的一阶导数,  $\mathbf{a}$  是空间坐标向量,  $\mathbf{H}[\cdot]$  是函数向量, 因而也会出现对三维空间坐标微分算子  $\nabla$ ,  $\nabla = (\partial/\partial a, \partial/\partial$

$\partial b, \partial/\partial c$ ) 表示在扩展介质中,可能存在扩散或传播, $\beta$  表示外部控制约束利用集中控制参数,函数  $U(t)$  表示来自系统内部或外部的各种作用力。

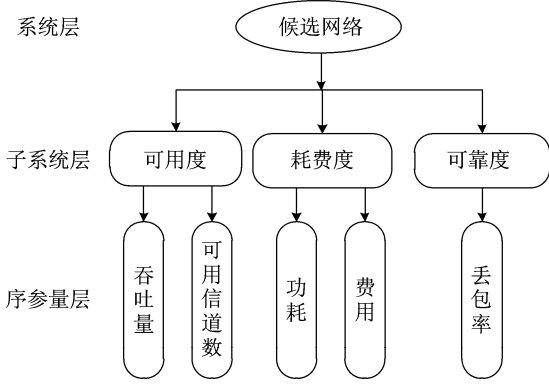


图 3 基于协同的参与聚合的候选网络的指标体系

Fig. 3 Synergetic assessment criteria of aggregation for candidate networks

动力学方程(12)在一般情况下是不可解的,需要进行多次建模,将高维非线性方程转化成一维非线性方程求解,再考虑临界点附近的状况情况。在多网络接入中考虑多个属性的动力学状态方程其维数随着考虑属性的个数以二次函数形式增加,在状态信息更新较多的多网络选择中,因聚合过程中大量计算而导致的网络处理时延急剧增加,并不合适用于网络选择中。

本文重新考虑协同中协同使役的本质,协同理论中系统性能协同度体现在整体的有序和无序,良好的系统是从无序到协同有序的状态。而信息学科的 Shannon 信息熵体现信息分布的协同有序程度<sup>[14]</sup>。因此,本文考虑从 Shannon 熵的角度来描述系统的协同状态。

属性子系统  $S_x$  的有序度越大,子系统的性能参数越优,属性子系统  $S_x$  的有序度  $Q_k$  计算可以利用序参量有序度的均值合成计算,即:

$$Q_x = \frac{1}{l_x} \sum_{j=1}^{l_x} A_{xj}, 1 \leq x \leq k \quad (13)$$

从 Shannon 熵的角度,可以利用子系统协同度的均值计算系统协同度的  $\Psi$ ,系统越有序其熵值越小,即<sup>[14]</sup>:

$$\Psi = - \sum_{x=1}^N \{ w_x \cdot \frac{1 - Q_x}{N} \ln(\frac{1 - Q_x}{N}) \} \quad (14)$$

其中  $w_x$  为属性子系统  $S_x$  对于系统整体影响的权

重,可以根据用户偏好指定。

计算得到单个网络  $i$  的协同度  $\Psi_i$ ,记该网络可以参与并行网络聚合的标记为  $\text{flag}$ ,定义为:

$$\text{flag} = \begin{cases} 1, & \text{if } \Psi_i \leq \Psi^{\text{th}} \\ 0, & \text{if } \Psi_i \geq \Psi^{\text{th}} \end{cases} \quad (15)$$

其中  $\Psi^{\text{th}}$  为系统整体协同度阈值,与用户的需求有关,  $\text{flag}=1$  表示可以参与聚合,则  $N$  个可用网络的基站  $\{\text{RAT}_1, \text{RAT}_2, \dots, \text{RAT}_N\}$  可构成多组参与聚合的候选网络。对通过单个网络协同度比较,能够选择整体性能更好的网络参与聚合,同时减少构成多网络方案集合的个数,减少计算复杂度。

假设  $N$  个网络不同的组合构成  $M$  种候选方案,  $M$  满足  $(M \leq 2^N)$ , 候选聚合方案集合定义为  $\{V_1, \dots, V_m, \dots, V_M\}$ , 对于候选方案  $V_m, m=1, 2, \dots, M$  的多个网络进行属性聚合如下:

多个无线网络的聚合功耗  $PC_{\text{sum}}(t)$ , 聚合吞吐量  $TO_{\text{sum}}(t)$ , 聚合费用  $CT_{\text{sum}}(t)$ , 聚合可用信道数  $X_{\text{sum}}(t)$ , 聚合丢包率  $ER_{\text{sum}}(t)$  依次定义为:

$$PC_{\text{sum}}(t) = \sum_{i \in V_m} PC_i(t) \quad (16)$$

$$TO_{\text{sum}}(t) = \sum_{i \in V_m} TO_i(t) \quad (17)$$

$$CT_{\text{sum}}(t) = \sum_{i \in V_m} CT_i(t) \quad (18)$$

$$X_{\text{sum}}(t) = \sum_{i \in V_m} X_i(t) \quad (19)$$

$$ER_{\text{sum}}(t) = \sum_{i \in V_m} ER_i(t) \quad (20)$$

其中  $PC_i(t), TO_i(t), CT_i(t), X_i(t), ER_i(t)$  分别为  $t$  时刻接入网络  $i$  对应的功耗值,吞吐量,费用,可用信道和丢包率。

对于  $M$  个候选聚合方案再次计算聚合网络的协同度来衡量网络性能。除了单网络考虑的三个属性系统外,网络聚合中希望在满足用户需求下,尽可能少占用网络个数,因此本文设计的聚合网络的协同度指标体系如图 4 所示。

根据式(13)~(15),计算各个聚合网络的协同度,选择协同度最大的聚合网络作为多网络选择方案。即:

$$F = \arg \min_m \Psi_{V_m} \quad (21)$$

多网络接入协同选择与聚合算法过程如表 1 所示。

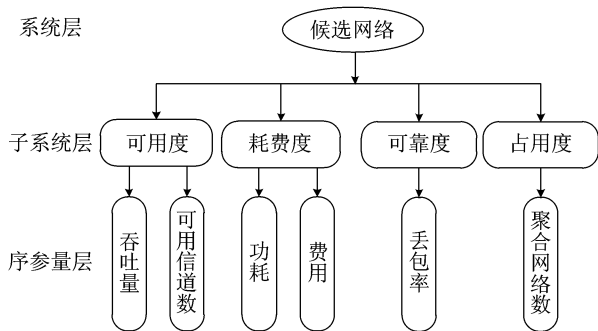


图4 基于协同理论的聚合网络性能指标体系  
Fig. 4 Synergetic assessment criteria for aggregated network

表1 算法描述  
Tab. 1 Algorithm description

多网络接入协同选择与聚合算法

1. 网络信息获取与参数处理:
2. 根据(4),对  $RSS_i(t)$  进行二次指数平滑处理
3. 可用网络标记:
4. While  $i < \text{the total number of gathering network}$
5. If(3)成立
6. Set  $RAT_i = 1$ ;
7. Else
8. Set  $RAT_i = 0$ ;
9. End if
10. End While
11. 根据式(13)(14)计算可用单个网络  $i, i = \{1, 2, \dots, N\}$  的协同度  $\Psi_i$ ;
12. 网络聚合半段:
13. If (15)成立
14. Set 聚合标记  $flag = 1$ ;
15. Else
16. Set  $flag = 0$ ;
17. End if
18. 对每个候选方案根据式(16)~(20)进行聚合;
19. 根据式(13)(14)计算每个聚合网络协同度;
20. 选取协同度最大的聚合网络作为最优方案。

本文在算法实现中,先通过阈值判断,确定网络是否可用,只对可用网络进行分析,缩小单个网络集合的大小;其次,通过计算单个网络协同度,选择协同度大的单个网络参与网络聚合,能够在有效衡量网络性能同时,进一步压缩计算中网络集合的空间大小,减少计算量。具体的计算复杂度分析如下。

对于覆盖区域内有  $A$  个网络覆盖,一个用户的多接入过程中,假设对于该用户的可用网络数为  $N$ ,在所有可用单网络协同度计算中需要加法运算  $18N$  次,乘法  $18N$  次。若通过单网络协同度判断后的网络个数为  $H$ ,可以形成  $2^H$  个多网络候方案,那么对于这些方案属性聚合中最大加法次数为  $5H \times 2^H$ ,属性聚合后再次计算  $2^H$  聚合网络的协同度中加法运算  $18 \times 2^H$  次,乘法  $18 \times 2^H$ 。因此,加法计算次数综合为  $(18+5H) \times 2^H + 18G$ ,乘法  $18 \times 2^H + 18G$ ,总运算次数为  $(36+5H) \times 2^H + 36G$ 。其中  $H < G < M$ 。不考虑性能排序仅考虑属性聚合, $M$  个网络属性聚合中加法次数为  $5M \times 2^M$ ,文献[7]中基于阈值判断的多接入算法中属性聚合次数为  $5N \times 2^N$ 。而实际密集异构网络中  $A \gg H$ ,在两阶段运用协同学多网络选择能够减少运算次数。在仿真中可以证明,随着网络数量的增加,两阶段协同学对于计算量的减少优势更加明显。

本文算法获得诸多性能优于与文献[7]基于阈值多接入算法,性能提升原因定性分析如下。

(1)阻塞率低:本文算法能够协同多个属性子系统进行网络选择,以有效度为指标的子系统包含吞吐量和可用信道数两个序参量,两种参数都较好表现的网络协同度大,即算法优先选择网络负担轻,吞吐量较大的网络,在满足吞吐量要求下,空闲信道保留数量多,降低用户接入阻塞率。

(2)平均用户吞吐量:能够根据用户所在位置接收到的信号强度,选择合适的网络接入,而非全部接入,将网络分配给系统收益最大的用户使用,能够提高信道使用收益,提升平均用户吞吐量。

(3)用户单位吞吐量对应的功耗,费用均降低:算法将包含功耗和费用的耗费度子系统,与包含吞吐量的有效度子系统进行协同判断,偏向选择选择吞吐量且功耗和费用相对小的网络接入,能够降低用户单位吞吐量对应的功耗和费用。

## 4 仿真实现与分析

### 4.1 仿真场景

本文通过 MATLAB 软件对算法进行仿真,网络仿真场景如图1所示,五个无线网络 UMTS, WiMAX,

WLAN1,WLAN2 和 WLAN3 构成多个重叠覆盖的异构网络。用户在初始时刻 $t=0$ 时随机出现在 $3.1\text{ km}^2$ 网络覆盖区域中,假设用户以 $5\sim 30\text{ m/s}$ 的速度在覆盖区域内移动,用户运动方向 $\theta$ 在 $[0,2\pi]$ 内服从均匀分布,并且限定用户在较短时间内不会移出网络覆盖区域。假定场景中各个无线网络使用频带相互正交,保证网络间无干扰,各网络参数如表 2 所示<sup>[15-16]</sup>。

表 2 基站网络参数

Tab. 2 Base stations' network parameters

参数	UMTS	WiMAX	WLAN1	WLAN 2	WLAN 3
基站坐标	(-50,0)	(200,0)	(0,-200)	(173,100)	(-173,100)
费用/(元/s)	1	0.6	0.4	0.4	0.4
丢包率	0.03	0.06	0.15	0.15	0.15
覆盖半径/m	3000	1500	200	200	200
总带宽/MHz	5	15	11	11	11
信道总数	20	40	10	10	10

假设网络数据业务到达率为均值 $\mu=1/40$ 业务/秒的泊松过程,业务持续时间是均值 $\lambda=3\text{ s}$ 的指数分布。业务类型为视频流业务,假设用户对传输速率的最低要求为 $TO^{\text{low}}$ 。场景中各个网络拥有信道数如表 1 所示,用户接入只能占用同一个网络的一个可用信道,当网络中可用信道均被占用,则该网络不再允许建立新的接入链路,此时若有新的业务产生则会发生一次接入拥塞。设用户最低的速率需求 $TO^{\text{low}}$ 为 $0.6\text{ Mbps}$ ,功耗最大值 $P^{\text{high}}$ 为 $100\text{ mW}$ ,阴影

衰落 $G(\mu,\sigma)$ 为均值 $\mu=0$ ,方差为 $\sigma=5\text{ dB}$ 的高斯分布,参考距离 $d_0=1\text{ m}$ 噪声功率 $N_o=9\times 10^{-10}\text{ mW}$ ,仿真中聚合网络性能指标体系中各个子系统权重 $w=\{0.4,0.2,0.1,0.3\}$ ,其余参数如表 3 所示<sup>[12]</sup>。

4.2 仿真结果与分析

为了验证本文算法的性能,仿真中将本文提出的多接入聚合算法与文献[7]多网络选择算法(MASA:Multi-Access Selection Algorithm),以及文献[14]中协同学单网络接入网络选择算法在相同的网络场景下进行性能比较。

图 5 是网络中接入阻塞率随用户数变化的仿真结果。随着用户到达数量上升,这三种多接入算法对应阻塞率都不断增加。在用户数量增加时,单位时间内发起新业务的用户数量上升,导致占用更多带宽和信道,用户接入失败概率加大。多网络接入算法相对单网络接入算法有更多的接入灵活性,网络选择方案更多,具有一定负载均衡能力,因而接入阻塞率低于单网络选择算法。在图中当用户数达到一定数量后,本文算法对应的阻塞率低于文献[7]算法,可以允许更多的新业务成功接入。这是因为本文算法能够协同多个属性子系统进行网络选择,以有效度为指标的子系统包含吞吐量和可用信道数两个序参量,两种参数都较好表现的网络协同度大,即本文算法优先选择网络负担轻,吞吐量较大的网络,在满足吞吐量要求下,空闲信道保留数量多,为新用户接入留有空间,用户阻塞率较低。

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

仿真参数	UMTS	WiMAX	WLAN 1	WLAN 2	WLAN 3
$d_0$ 处路径损耗 $L_0/\text{dB}$	5.27	27	8	8	8
终端接收功率门限 $RSS^{\text{low}}/\text{dBm}$	-110	-102	-85	-85	-85
终端固定发射功耗 $P_i^{\text{tr}}/\text{mW}$	20	12	8	8	8
终端固定接收功耗 $P_i^{\text{rr}}/\text{mW}$	18	8	4	4	4
基站固定发射功率 $P_i^{\text{bs}}/\text{dBm}$	30	27	20	20	20
基站最小接收功率 $P_i^{\text{br}}_{\text{min}}/\text{dBm}$	-108	-103	-95	-95	-90
路径损耗指数 $n_i$	3.76	3	4	4	4
传输功耗系数 $\kappa_i$	1/8	1/7	2/11	1/6	1/6
信息有效荷载占比 $\rho_i$	0.65	0.75	0.8	0.8	0.8

而基于阈值准入的文献[7]算法,满足全部可用网络都有可能接入,会造成网络选择不合理和信道收益低的问题。例如对于一些边缘用户虽然RSS达到接收阈值,但是由于路径衰减较大等诸多因素影响,获得的吞吐量收益并不理想,信道利用率低。文献[7]算法中多属性决策仅在网络聚合完成后,并不能对单个网络的多个属性进行协同判断,单个网络中的某些参数不足可能会在参数聚合中被其他网络的对应属性掩盖。而本文算法能够通过对于单网络的多个属性进行协同判断,实现并行网络的协同聚合,能够可以选择多个属性协同良好的网络聚合。算法中吞吐量和空闲信道数作为有效度子系统进行协同衡量,可以尽量选择接收信号情况好的网络,避免接入负担较重网络,降低用户接入时发生阻塞的可能。

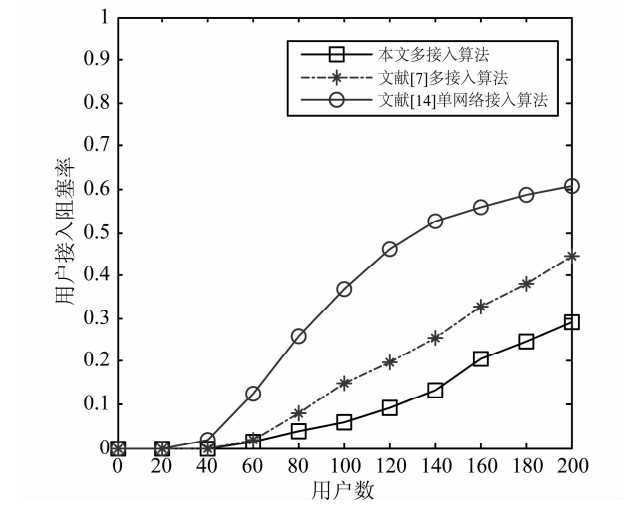


图5 用户接入阻塞率

Fig.5 Users accessing block rate versus users number

用户获得的平均吞吐量与用户数量关系如图6所示。单个网络接入算法的获得用户平均吞吐量要小于两种多网络选择算法,主要由于多网络选择算法允许用户与多个无线网络建立并行传输链路,从而提高了用户的吞吐量。从吞吐量曲线趋势来看,多接入算法获得用户吞吐量随用户到达而增加。当用户增加到一定数量后,每个用户获得的吞吐量增长速度放缓,最终网络负载达到饱和,平均吞吐量趋于稳定,此时本文算法平均吞吐量会略高于文献[7]算法。文献[7]算法阈值控制单网络接

入,满足阈值要求的单网络均允许聚合,在用户到达数量远小于场景中网络提供的信道总资源时,接入大量网络而获得高的吞吐量,但带来的问题是信道使用收益低,系统容量也会降低。本文算法中通过多个进行协同衡量,增大系统容量,充分利用信道资源,从而获得较高平均吞吐量。

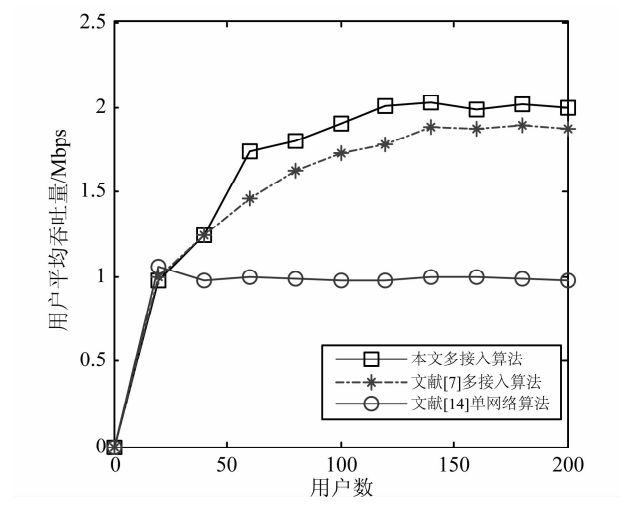


图6 系统中用户平均吞吐量

Fig.6 Average users throughput in system versus number of users

多网络并行接入通过建立多条链路可以提高网络吞吐量,但是会造成终端功耗增大,接入总费用增加。图7和图8分别是用户单位吞吐量对应的功耗和费用与用户数变化的关系。图中单位吞吐量功耗和费用曲线随着用户数增加而上升,最终曲线趋于平稳。这是因为网络能够接纳的用户和提供的资源是一定的,在用户数量较大时,在最优选择策略下,网络接入用户的总功耗和总费用趋于稳定。多接入获得吞吐量的增益要远大于付出功耗和费用的代价,因此实际用户每兆比特功耗和费用小于单网络选择算法。本文算法将包含功耗和费用的耗费度子系统,与包含吞吐量的有效度子系统进行协同判断,偏向选择吞吐量大且功耗和费用相对小的网络,因此本文算法获得用户每兆比特功耗,每兆比特对应的费用低于文献[7]多接入算法。

图9给出了系统中单网络选择算法,和未使用指数平滑本文算法与使用指数平滑处理本文算法



进行比较。仿真表明使用本文算法网络切换次数小于单网络选择算法,单网络选择由于仅能选择一个最优网络接入,当用户位置发生变化时,已接入网络的最优性可能发生变化,需要重新选择网络,增加网络切换次数。使用指数平滑处理能够有效减少网络切换次数。这是因为网络选择决策与 RSS 信号有很大关联,由于终端移动速度变化,网络负载,信道衰减等情况变化加大 RSS 信号波动,而这种波动具有突发性,对于接收信号 RSS 采用二次指数平滑处理,可以能够有效减少突发性影响,避免可能出现的“乒乓效应”。网络切换次数减小也能够降低终端功耗,从另一方面缓解由于多接入引起的功耗倍增问题,符合“绿色通信”的发展方向。

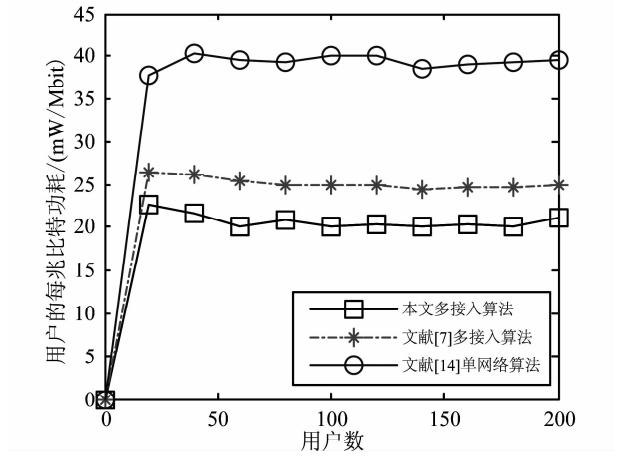


图 7 用户单位吞吐量下的功耗

Fig. 7 Users' power consumption per Mbit

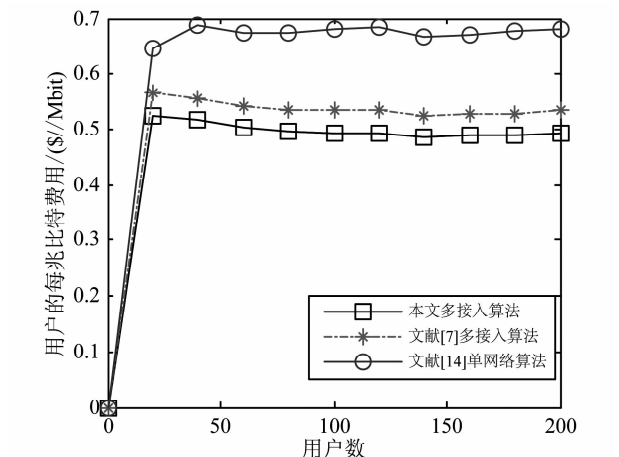


图 8 用户单位吞吐量下的费用

Fig. 8 Users' fees per Mbit

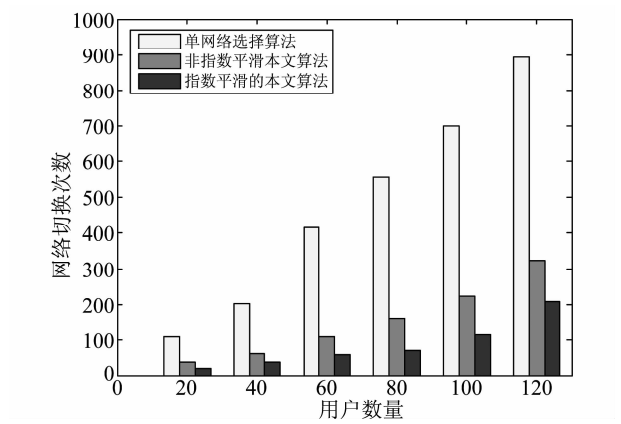


图 9 系统中网络切换次数

Fig. 9 Handoff number comparison versus number of users

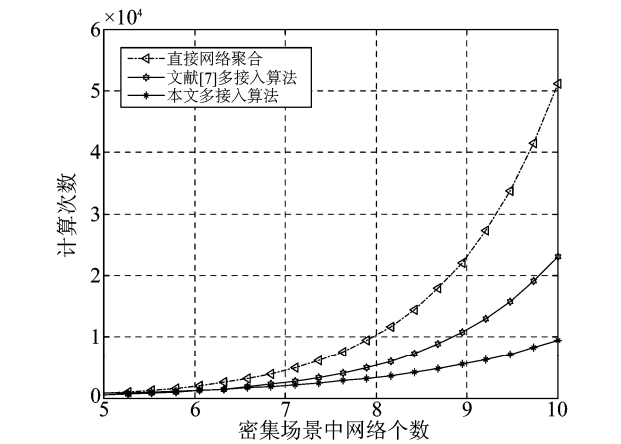


图 10 计算复杂度的比较

Fig. 10 Comparison of computational complexity

图 10 给出了本文协同学算法中对于一个用户接入过程中计算复杂度与场景中网络个数的关系,图中计算复杂度是算法全过程的计算中加法和乘法运算次数总和,包含了两阶段协同度计算和多网络属性聚合步骤。在对比中只考虑聚合过程的计算总次数,直接网络聚合是不考虑任何策略,将所有网络构成排练组合成多网络方案进行聚合所产生的计算次数。并给出文献[7]是简单阈值判断过程的计算复杂度。从图中对比可以发现,即使在对比方法仅考虑属性聚合过程中的计算量,也明显高于本文算法整个过程的计算量。本文先通过简单阈值条件判断,确定网络是否可用,在后续分析并只对可用网络进行计算,缩小单个网络集合的大小。其次,通过计算单个网络协同度,选择协同度大的单个网络参与网络聚合,能够在有效衡量网络

性能同时,进一步压缩计算中网络集合的空间大小,减少计算量。单个网络协同度计算过程的增加计算复杂度与网络个数  $M$  仅为线性关系,而减少多网络候选集合的个数是 2 的指数次关系。因此,随着网络数量的增加,两阶段协同学对于缩减计算量的优势更加明显。

## 5 结 论

采用多网络并行传输可以充分利用网络中的信道资源,提升网络性能。利用虚拟聚合方案提供用于透明多接入服务,顺应 3GPP 对下一代移动通信网络架构更加开放化和透明化的建议。本文将协同学应用于多网络选择和聚合中,算法基于吞吐量、可用信道数、功耗、费用及丢包率等多个参数构建网络协同度评价体系,可以对网络多个属性进行决策。将属性要求作为协同子系统,属于同一属性的不同参数作为子系统的序参量,序参量之间相互协同和制约,在单网络聚合控制,和聚合网络选择过程中分别计算协同度,全面衡量网络性能,减少网络聚合中的计算复杂度。实验表明,本文算法能够最大化信道使用效益,降低用户接入阻塞率,增加用户的平均吞吐量和系统容量,同时降低单位吞吐量对应的功耗和费用。采用单参数的二次指数平滑法处理接收信号,能够有效减少由于网络波动带来不必要的网络切换。在未来移动通信架构中,网络功能虚拟化趋势日益明显,多网络以虚拟聚合的方式为用户提供服务,能够用户接入层的功能结构进一步简化。本文是在协同学方法论指导下在并行网络虚拟聚合中应用,在具体的不同场景下可以建立符合需求的协同评价体系,可以考虑更多更贴切的参数和属性要求,具有极大的理论研究和应用价值。由于多网络接入网络状态采集与信息交换带来的功耗与网络数量成正比,未来应重点研究通过合理的接入机制,在保证 QoS 前提下,减少信道报告次数,降低多接入功耗,实现多网络接入中的“绿色通信”。

## 参 考 文 献

- [1] Cisco C V N I. Global mobile data traffic forecast update, 2013-2018[J]. White Paper, 2014.
- [2] 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.
- [3] Ma Xiao, Min Sheng, Yan Zhang. Flow splitting for multi-RAT heterogeneous networks[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Quebec City, QC, CAN, 2012: 1-5.
- [4] Aryafar E, Keshavarz-Haddad A, Wang M, et al. RAT selection games in HetNets[C]//IEEE INFOCOM 2013 Proceedings. IEEE, 2013, 12(11): 998-1006.
- [5] Zhang Lina, Zhu Qi. Multi-Access Selection Algorithm Based on Joint Utility Optimization for the Fusion of Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, 11, E97-B(11): 2269-2277.
- [6] Andreev S, Gerasimenko M, Galinina O, et al. Intelligent access network selection in converged multi-radio heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 86-96.
- [7] 张丽娜,朱琦. 基于多网络并行传输的异构网络接入选择算法[J]. 信号处理, 2014, 30(10): 1176-1184.  
Zhang Lina, Zhu Qi. Network selection algorithm based on multi-radio parallel transmission for heterogeneous wireless networks [J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(10): 1176-1184. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Koudouridis G P, Lundqvist H, Karimi H R, et al. A quantitative analysis of the throughput gains and the energy efficiency of multi-radio transmission diversity in dense access networks[J]. Telecommunication Systems, 2015, 59(1): 145-168.
- [10] Perpinias N, Palaos A, Riihijarvi J, et al. Impact of the path loss model on the spatial structure of shadow fading [C]//IEEE International Conference on Communications, 2014: 5871-5877.
- [11] He Rui, Zhong Zhanguo, Ai Bo, et al. Shadow fading correlation in high-speed railway environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(7): 3115-3124.

2762-2772.

- [12] 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. (in Chinese)

- [13] Haken H. Advanced synergetics: Instability hierarchies of self-organizing systems and devices[M]. Springer Science & Business Media, 2012.

- [14] Zhang Lina, Zhu Qi. Multiple attribute network selection algorithm based on AHP and synergetic theory for Heterogeneous Wireless Networks[J]. Journal of Electronics (China), 2014, 31(1): 29-40.

- [15] 赵景, 韩圣千. 协作异构网络中的用户接入与功率控制联合优化[J]. 信号处理, 2015, 31(10): 1279-1286.

Zhao Jing, Han Shengqian. Joint Optimization of User Access and Power Control in Cooperative Heterogeneous Networks[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31

(10): 1279-1286. (in Chinese)

- [16] Wang L, Kuo GSCS. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks—A tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 271-292.

## 作者简介



刘 斌 男, 1993 年生, 江苏新沂人, 南京邮电大学通信与信息系统硕士研究生, 主要研究方向为异构无线网络协同与融合技术、无线网络资源管理。

E-mail: mliubin@126.com



朱 琦 女, 1965 年生, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代移动通信技术、蜂窝异构网络中的干扰协调与容量优化、宽带无线接入技术、OFDM 技术、异构无线网络协同与融合技术和无线资源动态分配技术等。

E-mail: zhuqi@njupt.edu.cn