

# QoS 约束下多层异构蜂窝网中基于分层 休眠的节能机制研究

赵鹏飞 彭建华 罗文字 黄开枝

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002)

**摘 要:** 针对多层异构蜂窝网中资源分配和节能问题, 本文基于随机几何模型利用分布式配对算法实现了用户连接和资源分配的联合优化, 并利用分层休眠机制提升了系统的整体能效。首先, 采用随机几何工具对不同类型的基站进行建模, 在建立模型的基础上提出用户 QoS 约束下的最小化系统总功耗的联合优化方案, 然后将该方案分解简化为用户连接资源分配和基站休眠两个子问题, 并分别利用稳定配对算法和基于投票法的分层休眠机制加以解决。仿真和分析结果表明本文方法可以显著提升系统能效, 与已有的休眠策略相比具有更低的用户平均中断比。

**关键词:** 多层异构蜂窝网; 节能; 随机几何; 稳定配对算法; 分层休眠

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2015)09-1087-07

## Energy efficiency Mechanism of Hierarchical Sleep Mode in Heterogeneous Cellular Networks with QoS Constraints

ZHAO Peng-fei PENG Jian-hua LUO Wen-yu HUANG Kai-zhi

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to enhance spectral and energy efficiency in heterogeneous cellular networks, we used distributed stable matching to solve user association and resource allocation problems and utilized a hierarchical sleep mechanism to improve energy efficiency with modeling various base stations by stochastic geometry tools. Firstly, a joint optimization of minimized total power consumption based on the system model was proposed, which was under the constraint of user's QoS request. Then we decoupled it into two sub-problems, which were user association with resource allocation and base station sleep respectively. Finally we used stable matching algorithm and voting-based hierarchical sleep mechanism to solve above problem by oneself. Simulation results show that our scheme can effectively decrease system energy consumption, and has a lower user blocking ratio compared with existing sleep mechanisms.

**Key words:** heterogeneous cellular network; energy efficiency; stochastic geometry; stable matching; hierarchical sleep mode

### 1 引言

随着信息技术的飞速发展, 信息与通信技术已成为当今世界主要的能源消耗产业之一, 占据着全球 2% 的碳排放总额, 该份额将来还会不断增长<sup>[1]</sup>,

无线网络的能效指标 (J/bit) 已成为一个关键性能衡量标准<sup>[2]</sup>。不断增长的移动数据量需求, 使得无线运营商面临能源成本同步攀升的考验, 节能技术已成为电信运营商降低成本提升利润的关键所在<sup>[3]</sup>。异构蜂窝网 (HCNs) 在现有的宏蜂窝中部署

低功率的小基站,宏基站确保全网覆盖,小基站提供局部高速率的数据传输。小基站具有更短的发射距离,比宏基站消耗更少的能量,可以实现更高的能效<sup>[4]</sup>。文献[5-7]利用功率控制减少空中信号传输的能耗,基站中长期开启的部件占据着整个系统中大部分的功耗<sup>[8]</sup>,因此让部分基站进入休眠模式或是关闭状态可以实现有效地节能<sup>[9]</sup>。为了实现节能文献[10]提出在一簇基站中实施静态休眠机制,文献[11,12]在地域分割的簇内,针对用户分布采用动态休眠机制实现节能。

由于家庭基站等小基站的大量任意部署,异构蜂窝网呈现出复杂、异构、动态的特性,传统建模方法不能有效分析复杂的异构蜂窝网。利用随机几何可以比较精确的对异构蜂窝网建模,且易于分析计算<sup>[13]</sup>。本文针对包含宏基站、微基站、Pico、Femto等基站共存的异构蜂窝网,利用随机几何建立模型进行休眠策略的研究。不像文献[14]只考虑小基站的开关,也不同于文献[5]中只考虑宏基站的休眠,我们提出一种新的同时考虑宏基站和小基站的分层休眠机制。因为宏基站消耗大部分的功率,对其进行动态休眠可以实现能效的提升。而小基站的负载量具有较强的时变性,有些热点基站在举行会议、体育赛事时负载量较大,而其他时段处于闲置状态,有必要适时关闭这些小基站。

本文首先利用随机几何中泊松点过程对多层异构蜂窝网的基站和用户位置进行合理的建模描述,对用户接收功率、可达速率、能耗等关键性能参数进行科学表达;然后提出在用户 QoS 约束下系统能效最小化的联合优化方案,将该问题分解成用户连接资源分配子问题和基站休眠子问题,并分别利用稳定配对算法和基于投票的分层休眠算法解决;在保证用户 QoS 约束下关闭尽可能多的基站,通过两个子问题之间的循环迭代优化实现系统能效的提升。仿真和分析结果表明所用的分布式配对算法和分层休眠机制可显著提升系统能效,与已有的休眠策略相比具有更低的中断比。

## 2 系统模型和问题描述

### 2.1 系统模型

考虑包含  $K$  种不同类型基站的多层异构蜂窝网的下行链路,每层基站的发射功率  $P_k$ 、部署密度

$\lambda_k$ 、目标 SINR 门限值  $\beta_k$  各不相同,定义  $k \in \mathcal{K}, \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 。第  $k$  层基站的位置由密度为  $\lambda_k$  的独立泊松点过程 PPP  $\Phi_k$  建模,定义所有的基站集合为  $\Phi = \cup_{k \in \mathcal{K}} \Phi_k$ 。用户位置由密度为  $\lambda_u$  的独立 PPP  $\Phi_u$  建模,  $|\Phi_u|$  为用户集合的容量大小,这里  $|X|$  表示  $X$  的基数,为  $X$  的容量,不失一般性将典型用户  $u$  放在原点进行分析。利用正交频分复用多址接入 (OFDMA) 对频率进行分割,每个用户间分配的资源块数目,随着用户的业务类型、无线信道状况、基站的负载等因素的变化而不同。异构蜂窝网由于低功率小基站的部署带来的负载不均衡性,复杂多层拓扑结构导致干扰更加严重,可采用为小基站的平均接收功率添加大于 1 偏置的方法实现负载均衡,在小区边缘采用部分频率复用的方法实现干扰协调<sup>[15]</sup>。文中出于复杂性考虑没有采用这些方法,而只是采用小区内正交的频谱分配避免小区内干扰,分析时考虑其他各基站的干扰。对多层异构蜂窝网络建立的模型如图 1 所示。

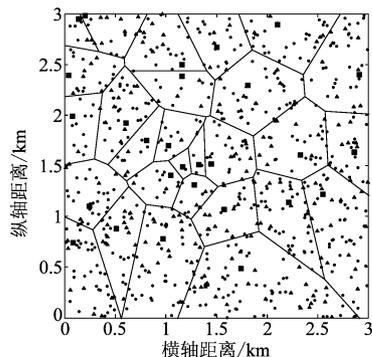


图1 文中建模所得的基站和用户位置点  
(其中方块代表宏基站;三角代表小基站圆点代表用户)  
Fig. 1 The base station and user's position (squares represent macro base stations, triangles represent small base stations and dots represent users)

第  $k$  层第  $i$  个基站的位置用  $x_{ki}$  表示,一个典型用户和其位于  $x_{ki}$  的接入基站间下行链路的小尺度功率衰落由  $h_{x_{ki}}$  表示,  $h_{x_{ki}} \sim \exp(1)$  服从独立相同指数分布(瑞利衰落),更为复杂的通用衰落模型会显著的增加计算复杂度,因此这里的下行链路功率衰落模型假设为瑞利衰落。标准的路径损耗函数为  $l(x) = \|x\|^{-\alpha}$ ,其中  $\|x\|$  表示  $X$  的 2-范数,则  $\|x_{ki}\|$  表示基站  $x_{ki}$  到原点用户的距离,  $\alpha > 0$  是路径损耗因子。典型用户在指定资源块上接收位于  $x_{ki} \in \Phi_k$  的

基站功率为:

$$P_{x_{ki}} = P_k h_{x_{ki}} \|x_{ki}\|^{-\alpha} \quad (1)$$

所有基站都开启情况下,用户受到来自所有共用相同频率基站的干扰,典型用户接收到基站  $x_{ki}$  的 SINR 为:

$$\gamma_{x_{ki}} = \frac{P_{x_{ki}} h_{x_{ki}} \|x_{ki}\|^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^K \sum_{x_j \in \Phi_j \setminus x_{ki}} P_{x_j} h_{x_j} \|x_j\|^{-\alpha} + N_0} \quad (2)$$

其中  $N_0$  是为噪声功率谱密度。

在每个资源块上,典型用户连接至基站的可达速率由  $R_{x_{ki}}$  表示,单位是 bits/s:

$$R_{x_{ki}} = \frac{W}{B} \log_2(1 + \gamma_{x_{ki}}) \quad (3)$$

其中  $W$  表示基站的总信道带宽,  $B$  是资源块总数。

假设基站  $x_{ki}$  分给典型用户  $u$  的资源块数为  $b_{u,x_{ki}}$ , 表示整个系统资源块分配情况的向量为  $\mathbf{b} = \{b_{u,x_{ki}}\}$ , 则典型用户接入基站  $x_{ki}$  的可达速率:

$$r_{x_{ki}} = b_{u,x_{ki}} R_{x_{ki}} \quad (4)$$

## 2.2 系统功耗

基站负载量定义为基站所服务用户占用的资源块数除以每个基站总资源块数,记为:

$$\rho_{x_{ki}} = \frac{\sum_{u \in \Phi_u} b_{u,x_{ki}}}{B} \quad (5)$$

其中  $b_{u,x_{ki}}$  为基站  $x_{ki}$  分配给所服务用户  $u$  的资源块数,  $0 \leq \rho_{x_{ki}} \leq 1, \forall x_{ki} \in \Phi$ 。

文献[16]针对基站功率消耗模型给出细致的定义:总功率等于硬件固定功率与信令传输消耗功率以及数据传输功率之和,由香农公式可知信令和数据消耗功率分别是各自数据传输速率的函数。为了便于分析,将信令消耗功率和数据消耗功率合并考虑,采用文献[9]中的功率消耗模型,基站的功率等于硬件运行固定消耗功率加上空中信号的发射功率,满负载时基站以最大功率发射,总发射功率均匀分配到每个负载资源块上,因此空中信号的发射功率由负载量  $\rho_{x_{ki}}$  决定。在  $x_{ki} \in \Phi$  情况下,第  $k$  层中任意一个基站  $x_{ki}$  有着相同的硬件功率消耗和功率模型系数,但负载量各不相同,  $k$  层中任意一个基站的功率消耗表达式为:

$$P_{x_{ki}} = \begin{cases} P_0^k + \Delta_k W P_{tm}^k \rho_{x_{ki}}, & q_{x_{ki}} = 1, \\ P_{sleep}^k, & q_{x_{ki}} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中  $P_0^k, \Delta_k, P_{tm}^k, P_{sleep}^k$  分别对应第  $k$  层任意一个基站的硬件固定消耗功率、功率模型系数、总发射功率、休眠时的功率,双变量  $q_{x_{ki}}$  表示第  $k$  层任意一个基站的状态,  $q_{x_{ki}} = 1$  表示基站工作、 $q_{x_{ki}} = 0$  为休眠,表示整个系统基站休眠状态的向量为  $\mathbf{q} = \{q_{x_{ki}}\}$ 。该模型假设基站总发射功率均匀分配给每个资源块,将发射功率和负载量对应起来,可以很好的描述基站通信负载量对功率消耗的影响。

## 2.3 问题描述

系统的全局目标是用户在一定 QoS 约束下,最小化所有基站的总功率消耗。用户 QoS 约束定义为满足一定数量用户的最小目标速率,由用户中断比  $(1 - P_{block})$  来描述这部分用户,  $P_{block}$  表示为中断用户和总用户数目的比值。系统优化问题可以归纳为以下公式:

$$\mathcal{P}: \min_{\mathbf{b}, \mathbf{q}} \sum_{x_{ki} \in \Phi} P_{x_{ki}} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{x_{ki} \in \Phi} b_{u,x_{ki}} R_{u,x_{ki}} \geq R_0, \forall u \in \mathbf{U}_{unblock} \quad (8)$$

$$\sum_{x_{ki} \in \Phi} 1(b_{u,x_{ki}}) \leq 1, \forall u \in \Phi_u \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{u \in \Phi_u} b_{u,x_{ki}} \leq B, \forall x_{ki} \in \Phi \quad (10)$$

$$q_{x_{ki}} \in \{0, 1\}, \forall x_{ki} \in \Phi \quad (11)$$

$$b_{u,x_{ki}} \in \{0, 1, \dots, B\} \quad (12)$$

(7) 式表示所有基站的总功率之和最小情况下,用户所分配资源和基站休眠状况,(8) 表示用户的 QoS 约束,非中断的那部分用户的目标速率要大于一定阈值  $R_0$ ,其中  $\mathbf{U}_{unblock}$  是容量为  $(1 - P_{block}) \times |\Phi_u|$  的任意用户集合,(9) 表示任意一个用户只能连接一个基站,其中  $1(\cdot)$  为指示函数,定义为  $1(x) = \begin{cases} 0 & \text{若 } x=0 \\ 1 & \text{若 } x>0 \end{cases}$ , (10) 表示基站可分配给用户的资源块数不大于基站的资源块总数, (11) 表示任意一个基站处于开启或关闭两种状态, (12) 为某一基站分配给典型用户的资源块数。

上述问题是资源分配和基站开关联合优化问题,为 NP 难题,在现有的知识条件下没有有效的算法可以在合理的时间内解决。在最差的情况下,用强力搜索的方法复杂度为  $O(|\Phi|^{|\Phi_u|})$ ,计算量随着

网络容量变化呈爆炸性增长<sup>[17]</sup>。在下一节中,我们提出将该问题进行分解的方案,利用分布式稳定配对算法来解决。

### 3 用户连接资源分配和基站休眠

问题 $\mathcal{P}$ 中包含两个变量的联合优化,基站为用户分配资源块指示变量  $\mathbf{b} = \{b_{u,x_{ki}}\}$  和每个基站休眠状态变量  $\mathbf{q} = \{q_{x_{ki}}\}$ 。将上述联合优化问题分解为用户连接资源分配子问题和基站休眠子问题,利用分布式稳定配对算法和分层休眠实现节能的资源分配。在第一个子问题中给定变量  $\mathbf{q}$ ,利用稳定配对算法选择最优的用户和基站连接和资源分配组合  $\mathbf{b}$ 。第二个子问题中给定用户连接  $\mathbf{b}$ ,可知每个基站的负载状况,采用分层休眠低负载量基站的方法降低系统能耗,得到基站的开关状况  $\mathbf{q}$ 。分层休眠的方法是首先关闭负载量小于一定阈值的小基站以实现闲置的热点基站节能,然后利用基于投票法的动态休眠策略休眠宏基站和一定密度比例的小基站,直到刚能满足用户的 QoS 为止。

#### 3.1 用户连接和资源分配的配对算法

为便于分析,我们假设用户选择其周围每一层基站中最近的  $n$  个基站作为候选基站,并向其发送连接请求,因为用户通常会连接至其周围最近的几个基站之一<sup>[18]</sup>,这种假设在实际系统中是合理的。该用户连接和资源分配子问题可以利用称为主/客问题的多对一配对方法描述,这里把基站当作主把用户作为客。每个用户期望能和满足其可达速率的基站建立连接,同时每个基站会为具有更高 SINR 的用户提供服务<sup>[19]</sup>。对传统配对算法进行适当的修改,可以为上述子问题提供分布式的解决方案。修改的配对流程如算法一所示:其中变量  $\text{UR}(u, x_{ki})$  表示用户  $u$  是否向基站  $x_{ki}$  发送过请求,  $\text{UR}(u, x_{ki}) = 1$  为请求过,  $\text{UR}(u, x_{ki}) = 0$  为没有请求过。当用户  $u$  成功连接到一个基站或者该用户的请求不能得到满足而被中断时变量  $\text{UFree}(u)$  的值为 0,否则变量  $\text{UFree}(u)$  的值为 1。 $\text{RB}(u)$  表示用户  $u$  所需要的资源块数目,  $\text{RRB}(x_{ki})$  表示基站  $x_{ki}$  剩余的资源块数目。 $\text{UI}(x_{ki})$  表示基站  $x_{ki}$  所服务的用户索引列表。

#### 算法 1: 用户连接和资源分配的稳定配对算法

1. 初始化: 用户端在每层基站中选择距离最近的  $n$  个基站按照接收信号的 SINR 创建参考表  $\text{UP}(u)$ , 设置  $\text{UR}(u, x_{ki}) = 0$  即任意一个用户对所有基站都还没有发送过请求, 用户和基站没有建立连接  $\text{UFree}(u) = 1, \forall u \in \Phi_u$ 。
2. 将用户连接至基站或将其中断
  - (1) 如果存在用户没有连接基站  $\text{UFree}(u) = 1, \forall u \in \Phi_u$ 
    - 如果存在基站  $x_{ki}$  用户还没请求过, 则  $\text{UR}(u, x_{ki}) = 0$ , 转到 2-2;
    - 否则  $\text{UFree}(u) = 0$ , 将该用户中断, 转到 2-3。
  - (2) 用户  $u$  向参考列表  $\text{UP}(u)$  中排列靠前的基站  $x_{ki}$  发请求
    - 标记该用户已请求过  $\text{UR}(u, x_{ki}) = 1$ ;
    - 如果基站  $x_{ki}$  有足够的资源给用户  $u$ , 则基站接收该请求, 设置用户已连接  $\text{UFree}(u) = 0$ ;
    - 如果存在部分已连接用户的 SINR 小于新请求用户的 SINR, 并且这部分 SINR 较低的已连接用户所占资源块+基站剩余资源块可满足新请求用户的速率需求, 则将这部分已连接用户断开与基站的连接, 并将其  $\text{UFree}(u)$  值设为 1, 等待下一轮配对接入, 同时将新请求用户接入基站并设置其  $\text{UFree}(u)$  值为 0;
    - 否则基站拒绝用户  $u$ 。
  - (3) 对所有用户重复 2-1, 直到所有用户对候选基站都请求过或者用户被中断  $\text{UFree}(u) = 1, \forall u \in \Phi_u$  为止。

初始的多对一配对算法只是基于 SINR 建立参考表,在基站和用户之间进行配对,这里我们加入资源块数目  $B$  的约束,当某一基站被请求用户过多大于该基站资源块数目限定的承载能力时,通过配对算法将剩余用户卸载到临近负载量低的基站上以实现负载均衡的效果。根据文献[20]中的证明,所提的算法可以得到稳定的匹配结果,该结果对于所有用户和基站的组合是最优的,算法的平均复杂度是:  $\mathcal{O}(n |\Phi_u| \ln(|\Phi|))$ 。

#### 3.2 基站休眠策略

根据配对算法所得的连接结果和基站的负载量信息,可以决定系统中的基站如何休眠。这里采用分层休眠的思想,方法是先将负载量小于一定值的热点小基站关闭,接着利用投票法休眠最低负载量的宏基站,同时休眠一定密度比的小基站。

休眠小基站可以有效地减少闲置热点基站的

功率消耗,首先关闭负载量小于一定阈值小基站。为实现对宏基站执行分布式的休眠,我们引入一种新的变量  $\text{votes}(x_{ij})$  来表述宏基站  $x_{ij}$  的负载水平。每个宏基站向其周围的最近的  $n$  个基站发布其负载量  $\rho_{x_{ij}}$ ,每个宏基站都可以收集到来自周围基站的负载量信息,为周围负载量最小的宏基站投一票,被投票的宏基站  $\text{votes}(x_{ij}) = \text{votes}(x_{ij}) + 1$ ,所有宏基站  $\text{votes}$  的初始值为 0,最后将  $\text{votes}$  值最高的那一个宏基站休眠。同时根据负载量状况和小基站相对于宏基站的密度比  $\lambda_2/\lambda_1$ ,关闭负载量最小的  $\lceil \lambda_2/\lambda_1 \rceil$  个小基站实现分层休眠,其中  $\lceil \cdot \rceil$  为四舍五入取整运算。

在休眠策略执行完之后,可知基站的具体开关状况,重新代入执行配对算法。上述过程一直迭代到用户的中断比超过预先定义的门限值  $P_{\text{block}}$  时截止,这样能得到刚能满足中断约束的最小数目的激活基站的状态。因为每经过一次关闭基站,减少了可提供服务的基站资源,用户的中断比会增加,该休眠算法可以实现明确的收敛特性。

当休眠基站周围负载量突发增大时,可以设定系统中最大  $\text{votes}$  值的宏基站带动周围休眠基站的激活。通过缓慢减少和增加基站功率的小区萎蔫和小区开放的方法,休眠低负载的基站和唤醒负载量增加环境下已休眠的基站,实现用户稳定的切换<sup>[21-22]</sup>。

## 4 仿真和分析

为降低仿真复杂度我们只考虑包含宏基站和小基站的两层异构蜂窝网,根据文中的定义可以很容易地拓展到多层基站的休眠。仿真利用文献[23]中 LTE 协议规范参数,参数设置见表 1,基站和用户位置都由 PPP 随机生成,如图 1 所示。测试一分钟内不同休眠策略下系统的能耗,每一次变更基站和用户位置以及信道状况的周期为 1 秒,并在每 1 秒内独立生成用户的 QoS 需求,从目标速率集  $\mathcal{R} = \{0.1, 0.2, \dots, 1.0\}$  Mbps 中为一个用户随机选择目标速率,在每一秒内执行一轮配对和关闭基站的迭代。由于每轮迭代时基站和用户的位置随机变化,到达中断比约束的基站关闭次数也不相同,这里采用多次仿真求平均的方法,得到更具一般性的能效变化曲线,如图 2 所示。

随着休眠基站的增多,系统的总功耗呈现递减趋势,然而由于采用了稳定配对方法在宏基站和小基站间实现了负载均衡,系统的总通信量下降幅度不大,进而实现系统能效的提升。在关闭基站的最后阶段,由于基站关闭数目较多使得用户可用的基站频率资源显著减少,系统总通信量快速下降,用户中断比急剧上升,使得能效曲线存在一个最高点,实际休眠操作时可以参考该点作为基站休眠执行点。

图 3、4 对比不休眠、周期休眠、动态休眠<sup>[11]</sup>、动态休眠<sup>[12]</sup>和只休眠宏基站<sup>[6]</sup>方法所得的中断比和功耗性能曲线。在不休眠策略中,所有基站任何时间都处于激活状态;周期休眠<sup>[10]</sup>中,宏基站利用地域的相似性划分为三个不相邻的簇,每次一个簇中只有一个宏基站可以休眠,并且以轮流的方式实现周期休眠。上两种方式都没有保证用户的中断比。在动态休眠<sup>[11]</sup>的每一簇中,利用作者提出的预测算法休眠一定的宏基站。在动态休眠<sup>[12]</sup>的每一簇中服务最小数量的宏基站将被休眠,直到用户中断比超过一定门限。文献[6]只休眠宏基站可以得到较低的中断比和单位小区能耗,但其没利用到小基站的节能潜力。不休眠、周期休眠、动态休眠<sup>[11]</sup>、动态休眠<sup>[12]</sup>、休眠宏基站和本文所提的休眠方法所需要的信息交互量分别是 0、0、2、2、3、3,通过增加更多的信息交互的周围基站间的协作,可以提取出更多节能的潜力。

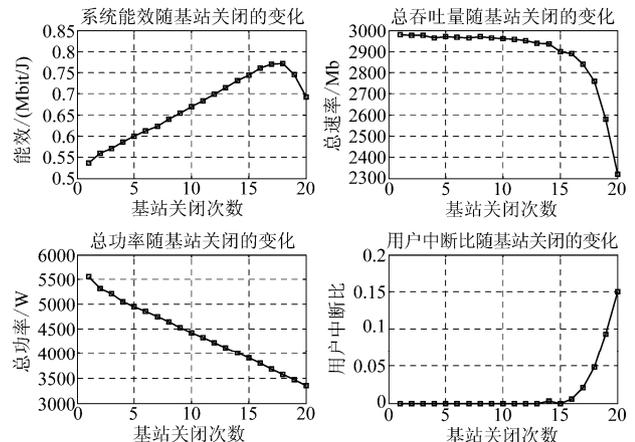


图 2 系统能效、吞吐量、总功耗和用户平均中断比随迭代次数变化曲线

Fig. 2 The curve of energy efficiency, throughput, total power consumption and blocking ratio with iterations

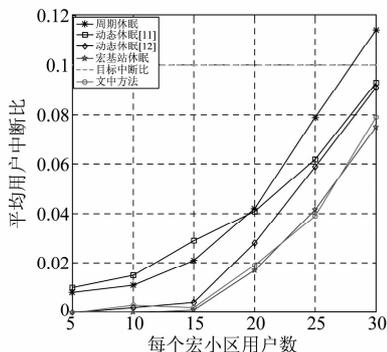


图3 与已有的算法比较用户平均中断比

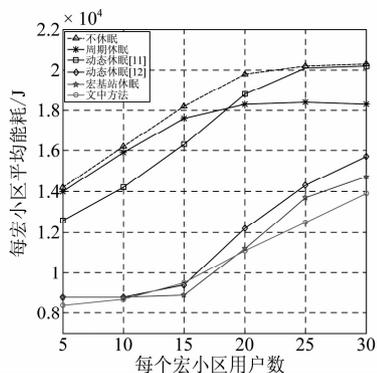
Fig. 3 The comparison of user blocking ratio at target  $P_{\text{block}}=0.1$ 

图4 与现有算法比较单位小区功耗的变化

Fig. 4 The comparison of Energy consumption at target  $P_{\text{block}}=0.1$ 

表1 仿真参数设置

Tab. 1 Parameters for simulation

参数	表达式	数值
宏基站密度	$\lambda_1$	4 BS/km <sup>2</sup>
小基站密度	$\lambda_2$	20 BS/km <sup>2</sup>
用户密度	$\lambda_u$	80 UE/km <sup>2</sup>
宏基站最大发送功率	$P_{tm}^1$	46 dBm
小基站最大发送功率	$P_{tm}^2$	30 dBm
中断比的阈值	$P_{\text{block}}$	0.1
路损因子	$\alpha_1, \alpha_2$	4
总带宽	$W$	10 MHz
总资源块数目	$B$	50
宏基站固定功率	$P_0^1$	130 W
小基站固定功率	$P_0^2$	4.8 W
宏基站发射功率系数	$\Delta_1$	4.7
小基站发射功率系数	$\Delta_2$	8
休眠的宏基站功率消耗	$P_{\text{sleep}}^1$	75 W
休眠的小基站功率消耗	$P_{\text{sleep}}^2$	1 W

## 5 结论

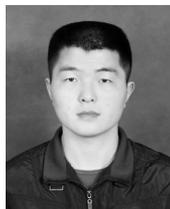
本文利用随机几何建模多层异构蜂窝网络,在保证用户 QoS 的前提下为系统能耗最小化提出了一种分布式资源分配和休眠算法。该算法包含两部分,基于稳定配对算法的用户连接资源分配和基于投票算法的基站分层休眠机制。仿真结果表明相比于已有的基站休眠策略,本文方法可以减少系统能耗并降低用户中断比。在下一步研究工作中,我们将在分层休眠的基础上,针对业务量的变化科学动态地休眠和唤醒基站,保证用户的服务质量并提升系统的能效。

## 参考文献

- [1] Chavarria R E, Akyildiz I, Fadel E. Energy consumption analysis and minimization in multi-layer heterogeneous wireless systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, Volume: pp, Issue: 99.
- [2] Rao J B, Fapojuwo A O. A survey of energy efficient resource management techniques for multicell cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1):154-180.
- [3] 戴翠琴, 王亮. OFDM 中继系统中减少反馈的节能机制研究[J]. 信号处理, 2015, 31(1):111-118. DAI Cui-qin, WANG Liang. Energy Saving Method with Reduced Feedback in OFDM Relay System[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(1):111-118. (in Chinese)
- [4] Singh S, Andrews J G. Rate distribution in heterogeneous cellular networks with resource partitioning and offloading [C] // 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013:3796-3801.
- [5] Ren P, Tao M X. A decentralized sleep mechanism in heterogeneous cellular networks with QoS constraints[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(5): 509-512.
- [6] Miao G, Himayat N, Li G Y, et al. Distributed interference-aware energy-efficient power optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1323-1333.
- [7] Kwak J, Son K, Yi Y, et al. Impact of spatio-temporal power sharing policies on cellular network greening [C] // 2011 IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks

- (WiOpt), 2011:167-174.
- [8] Imran M A, Katranaras E, Auer G, et al. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown[R]. Tech. Rep. ICT-EARTH deliverable, 2011.
- [9] Frenger P, Moberg P, Malmudin J, et al. Reducing energy consumption in LTE with cell DTX[C]//2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011:1-5.
- [10] Abdallah K, Cerutti I, Castoldi P. Energy-efficient coordinated sleep of LTE cells[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012:5238-5242.
- [11] Adachi K, Joung J, Sun S, et al. Adaptive coordinated napping (conap) for energy saving in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(11):5656-5667.
- [12] Adachi K, Sun S. Power-efficient dynamic BS muting in clustered cellular system[C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012:1149-1154.
- [13] Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Coverage and ergodic rate in K-tier downlink heterogeneous cellular networks[C]//2011 IEEE 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 2011:1627-1632.
- [14] Saker L, Elayoubi S E, Combes R, et al. Optimal control of wake up mechanisms of femtocells in heterogeneous networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):664-672.
- [15] Singh S, Andrews J G. Joint resource partitioning and off-loading in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 13(2):888-901.
- [16] Vu T T, El Tabach M, En-Najjary T. Energy modeling and optimization of radio access network using stochastic deployment models[C]//2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2014:895-900.
- [17] 陈瑾平, 杨绿溪. OFDMA系统基于QoS保证和最大最小公平性准则下的动态资源分配[J]. 信号处理, 2011, 27(12):1824-1830.
- Chen Jinping, Yang Luxi. Dynamic Resource Allocation for QoS-aware OFDMA Systems with Max-min Fairness Constraint[J]. Signal Processing, 2011, 27(12):1824-1830. (in Chinese)
- [18] Hasan M, Hossain E. Distributed Resource Allocation in 5G Cellular Networks[J]. arXiv preprint arXiv:1409.2475, 2014.
- [19] Jorswieck E A. Stable matchings for resource allocation in wireless networks[C]//2011 IEEE 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP), 2011:1-8.
- [20] Roth A E, Sotomayor M A O. Two-sided matching: A study in game-theoretic modeling and analysis[M]. Cambridge University Press, 1992.
- [21] Marsan M A, Chiaraviglio L, Ciullo D, et al. Switch-off transients in cellular access networks with sleep modes[C]//2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2011:1-6.
- [22] Conte A, Feki A, Chiaraviglio L, et al. Cell wilting and blossoming for energy efficiency[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5):50-57.
- [23] Access E U T R. Further advance-ments for E-UTRA physical layer aspects[R]. 3GPP TR 36.814, 2010.

### 作者简介



赵鹏飞 男,1986年生,河南确山人,硕士生,主要研究方向为异构蜂窝网无线资源管理。

E-mail:475903980@qq.com

彭建华 男,1966年生,湖南衡阳人,教授,博士生导师,主要研究方向为移动通信系统及无线网络安全。

E-mail: pengjianhua@ndsc.com.cn

罗文字 男,1982年生,河南正阳人,讲师,主要研究方向为异构蜂窝网络、通信信号处理、无线物理层安全。

E-mail:lwy\_xd@163.com

黄开枝 女,1973年生,安徽来安人,教授,博士生导师,主要研究方向为无线移动通信网络及信息安全。

E-mail:huangkaizhi@tsinghua.org.cn