

## Femtocell 双层网络中基于 Q-learning 的子信道分配方案

杨秀清<sup>\*①</sup> 陈 禹<sup>①</sup> 李正富<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(北京电子科技职业学院电信工程学院 北京 100176)

<sup>②</sup>(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

**摘 要:** 在 Femtocell 家庭基站(Femtocell Base Station, FBS)组成的异构网络中, 为提升网络的频谱效率, FBS 与 Macrocell 宏基站(Macrocell Base Station, MBS)一般要求是同频部署, 然而同频部署会产生同信道干扰。为了实现 FBS 的大规模部署, 降低网络同信道干扰影响变得尤为重要。该文提出一种基于 Q-learning 的子信道分配方案, 既保证大量部署的 FBS 不会对 MBS 带来过高的跨层干扰, 同时也降低了 FBS 之间的同层干扰。同时针对 FBS 稀疏部署和密集部署的场景, 分别进行了算法的仿真验证, 其仿真结果表明该算法降低了干扰, 验证了理论的正确性。

**关键词:** Femtocell; 双层网络; Q-learning; 子信道分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0598-07

DOI: 10.11999/JEIT160453

## Subchannel Allocation Scheme for Two-tire Femtocell Networks Based on Q-learning

YANG Xiuqing<sup>①</sup> CHEN Yu<sup>①</sup> LI Zhengfu<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Telecommunication Engineering, Beijing Polytechnic, Beijing 100176, China)

<sup>②</sup>(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In order to improve the spectrum efficiency in the Femtocell home Base Station (FBS) heterogeneous network, FBS and Macrocell Base Station (MBS) are usually deployed with the same frequency. However, the same frequency deployment will inevitably lead to larger co-channel interference. In order to achieve the large-scale deployment of FBS, reducing the interference of the network with the channel is particularly important. In this paper, a sub channel allocation scheme is proposed based on Q-learning. It can ensure that FBS will not bring high cross-layer interference of MBS, while it reduces the same layer interference between two FBS. The simulation of the algorithm of FBS sparse deployment and dense deployment situation are performed, respectively. Simulation results show that this algorithm reduces the same layer interference and verifies the correctness of the theory.

**Key words:** Femtocell; Two-tire networks; Q-learning; Subchannel allocation

### 1 引言

由于 FBS 与 MBS 形成的异构网络遭受的干扰复杂多变, 用户对网络的 QoS(Quality of Service)要求也越来越高, 因此, 抑制 FBS 网络带来的干扰, 保证用户时延、最低数据速率要求等 QoS 指标是亟需解决的重要问题。目前在 Femtocell 异构双层网络中的干扰管理和抑制的具体策略可以分为干扰消除、干扰避免以及小区间干扰协调 3 大类。

干扰消除是一种基于物理层的处理技术, 通过接收机的处理增益从而消除干扰<sup>[1]</sup>。文献[2]设计 FBS 之间的频率复用机制来降低 FBS 之间的同层同频干扰。文献[3]考虑引入叠加编码技术, 并设计合理的功率控制方式实现干扰消除。由于干扰消除技术要求小区间严格同步、信令开销大、算法复杂, 因此在目前 FBS 网络中并没有得到广泛采用。

Vikram 等人<sup>[4]</sup>提出了异构双层网络中的频谱分割, 不同类型的用户接入不同的频段以实现干扰避免。文献[5]分析了基于 CDMA 的 FBS 网络中的网络容量与干扰避免问题。杜晓玉等人<sup>[6]</sup>提出了一种动态调整异构双层网络中频率划分的方式。文献[7]提出了一种基于图论聚合的干扰避免策略。文献[8]提

收稿日期: 2016-05-03; 改回日期: 2016-11-15; 网络出版: 2016-12-29

\*通信作者: 杨秀清 yangxql@163.com

基金项目: 北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201710858003)

Foundation Item: The Science and Technology Projects of Beijing Municipal Education Commission(KM201710858003)

出一种基于干扰余量的干扰避免策略。文献[9]提出了一种基于混合频率指定的干扰避免策略。文献[10]中提出了基于信道分配的干扰避免方式。考虑到未来具大移动数据流量需求,在 FBS 中引入多天线技术将成为必然,因此,对具有多天线 FBS 通过波束选择与波束赋形进行干扰避免也得到了广泛的关注<sup>[11-13]</sup>,但频率利用率相对较低的缺陷成为干扰避免不得不解决的问题。

在 FBS 异构双层网络中, FBS 可以将小区间干扰协调与自组织技术结合,自适应地调整其对信道的使用和发射功率,优化室内覆盖,降低同层和跨层干扰,提升网络容量和频谱效率。文献[14]提出了基于斯塔克伯格博弈的分布式功率控制算法,减小了双层网络中的跨层干扰问题。文献[15]引入了超模博弈模型,并考虑了 Femtocell 的公平性,设计了 Femtocell 网络的干扰抑制算法。文献[16-19]研究了软频率复用技术在 FBS 异构双层网络中的应用,虽然复用度有所提高,但是由于在密集部署的 FBS 执行软频率复用而进行频率规划、基站间的大量协调或者集中式的节点等,与 FBS 自组织的特征不符。

为保障 FBS 与 MBS 形成的异构双层网络中不同基站的和谐共存和正常运行,本文对降低网络同信道干扰进行了研究,提出了在优先保证宏用户的效用,不对其造成干扰的情况下来进行 FBS 的最优子信道分配方案。考虑到不同业务对网络性能参数的要求不同,及针对抑制业务的需求不同,在子信道充足的情况下应分配相应数量的子信道,以满足业务的吞吐量需求。因此,本文将把有效容量引入到效用函数中,保证用户对多媒体业务的时延 QoS 要求,并提出根据抑制用户的吞吐量需求自适应分配子信道的算法。

同时,考虑到 FBS 是由用户随机部署, FBS 会随时接入或离开网络, FBS 需要有自组织能力,而 Q-learning 强化学习算法可以根据环境状态的变化优化自身的参数、性能指标等,因此,本文将采用 Q-learning 机制设计分布式的子信道分配算法,其中,各个 FBS 都被设计成智能体,通过学习选择最优的子信道分配方案。采用 Q 算法的优越性主要有:(1)收敛速度快;(2)把有效容量用 Q 学习实现;(3)考虑了同层跨层干扰。因此基于该学习理论可以大大增强 FBS 基站的自组织,自我学习的能力。

本文所提出的一种基于 Q-learning 的子信道分配方案,既保证大量部署的 FBS 不会对 MBS 带来过高的跨层干扰,同时也降低了 FBS 之间的同层干扰。在仿真中,本文针对 FBS 稀疏部署和密集部署的场景分别进行了算法的仿真验证。

## 2 Femtocell 双层网络建模

### 2.1 建立 Femtocell 双层网络模型

本节提出 FBS 异构双层网络下行链路场景,如图 1 所示。一个代表性的 MBS 下面覆盖了若干个 FBS,每个 FBS 服务于它的家庭用户(Femtocell User, FUE),并且一个 FUE 只受控于一个 FBS。FBS 与 MBS 采用共信道的方式公用所有频谱。

为了方便理解,现做下述定义:设所有基站(包括 MBS 和 FBS)集合为  $B = \{0,1,2,\dots,B\}$ ,  $b \in B$ ,  $b = 0$  表示 MBS,  $b \in \{1,2,\dots,B\}$  表示 FBS。设  $N = \{1,2,\dots,N\}$  表示全部用户集合,  $N_b$  表示基站  $b$  中的用户集合,由于每个用户仅由其中一个基站服务,因此,有如下等式成立  $N_b \cap N_{b'} = \emptyset$ ,  $b \neq b'$ ;  $N_0 \cup N_1 \cup \dots \cup N_B = N$ 。设所有子信道集合为  $C = \{1,2,\dots,C_{\text{sub}}\}$ ,  $C_{\text{sub}}$  表示子信道,若  $C_{bn}$  表示基站  $b$  分配给用户  $n$  的子信道集合,为了避免小区内用户间的干扰,同一时刻每个小区中的某个子信道只能分配给其中一个用户,即,  $C_{bn} \cap C_{b'n'} = \emptyset$ ,  $\forall n, n' \in N_b$ 。用  $g_{bn}^c$  表示在子信道  $c$  上基站  $b$  到用户  $n$  的增益,用  $\sigma^2$  表示信道的高斯白噪声,用  $p_{bn}^c$  表示在子信道  $c$  上基站  $b$  向用户  $n$  发射的功率,基站  $b$  向用户  $n$  发射的功率的集合  $p_n$  应满足:

$$p_n = \left\{ p_{bn}^c \geq 0, \sum_{c=1}^{C_{\text{sub}}} p_{bn}^c \leq \bar{p}_{bn}^{\text{max}}, c \in C, n \in N \right\} \quad (1)$$

式中,  $\bar{p}_{bn}^{\text{max}}$  表示基站  $b$  向用户  $n$  发射的最大功率。基站  $b$  在进行子信道分配时,若基站  $b$  没有将子信道  $c$  分配给用户  $n$ ,则  $p_{bn}^c = 0$ ,否则平均分配功率。

因此,基站  $b$  用户可达到的最大数据速率表示为

$$R_{bn} = \sum_{c=1}^{C_{\text{sub}}} w \log_2 \left( 1 + \frac{g_{bn}^c p_{bn}^c}{\sigma^2 + I_{bn}^c} \right) = \sum_{c=1}^{C_{\text{sub}}} r_{bn}^c \quad (2)$$

式中,  $w$  表示单个子信道的带宽,  $I_{bn}^c = \sum_{b'=0, b' \neq b}^B g_{b'n}^c p_{b'n}^c$  表示基站  $b$  中用户  $n$  在子信道  $c$  上遭受的干扰。

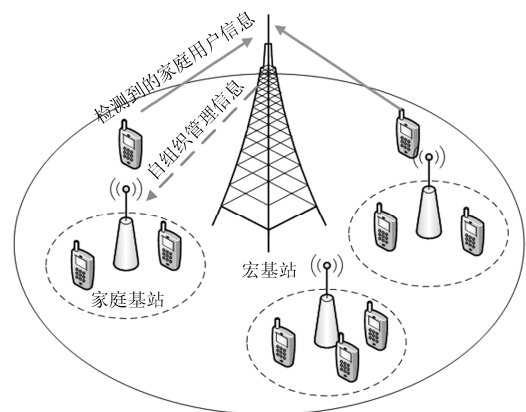


图 1 Femtocell 双层网络场景图

## 2.2 有效容量

由于无线网络的时变特性, 保障时延敏感业务(如视频电话, 视频会议, 在线视频, 游戏等)的 QoS 要求是当前无线网络面临的非常重要且具有很大挑战的问题, 尤其是为移动业务提供确定的时延保障。为了解决这个问题, 一些学者提出了有效容量的概念, 文献[20]引入了超模博弈模型, 并考虑了 Femtocell 的公平性, 设计了 Femtocell 网络的干扰抑制算法。有效容量被定义为在时变信道中有统计时延 QoS 指数  $\theta$  约束下能达到的最大持续到达率。有效容量可以表示为

$$E_C(\theta) = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta t} \ln \mathbb{E} \left( e^{-\theta L[t]} \right) \quad (3)$$

式中,  $L[t] = \sum_{i=1}^t R[i]$  是相应的时间累积服务过程,  $R[i]$  表示在第  $i$  帧中的数据服务速率,  $\mathbb{E}(\cdot)$  表示对信道状态取期望值。  $\theta$  表示时延指数, 对于给定的时延限制  $D_{\max}$ , 平稳状态下的时延概率<sup>[20]</sup>可以表示为

$$P_r(D > D_{\max}) \approx e^{-\theta L[t] D_{\max}} \quad (4)$$

式中,  $D$  表示被调度的用户遭受的时延, 从式(4)可以看出时延指数  $\theta$  越大, 相应的时延敏感业务对时延要求越高, 需要更高的时延保障, 反之亦然。

假定服务过程是平稳的各态历经的随机过程, 即  $\{R[i], i = 1, 2, \dots\}$  是不相关的, 因此, 有效容量可以简化为

$$E_C(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \mathbb{E} \left( e^{-\theta R[i]} \right) \quad (5)$$

## 2.3 问题建模

基于以上有效容量的讨论, 基站  $b$  中用户  $n$  的有效容量可以表示为

$$\begin{aligned} E_{C, \text{bn}}(\theta_{\text{bn}}) &= -\frac{1}{\theta_{\text{bn}}} \ln \mathbb{E} \left( e^{-\theta_{\text{bn}} R_{\text{bn}}} \right) \\ &= -\frac{1}{\theta_{\text{bn}}} \sum_{c=1}^{C_{\text{sub}}} \ln \mathbb{E} \left( e^{-\theta_{\text{bn}} r_{\text{bn}}^c} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

除了不同业务对时延 QoS 要求不同外, 有些用户的业务对网络最低吞吐量也有一定的要求, 例如视频会议、在线游戏、视频直播等。因此, 保证用户最低吞吐量的要求是实现视频会议、在线游戏、视频直播等业务的前提。本文中基于 Q-learning 的子信道分配的目标即为

$$\left. \begin{aligned} \max E_{C, \text{bn}}(\theta_{\text{bn}}) \\ \text{s.t. } E_{C, \text{bn}}(\theta_{\text{bn}}) \geq \bar{E}_{C, \text{bn}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## 3 基于 Q-learning 的子信道分配算法

由于无线频谱资源的有限性, Femtocell 异构网络可分配的子信道数量是有限的, 这和 Q-learning 强化学习算法中有限的可执行动作非常匹配, 因此,

将 Q-learning 理论应用于 Femtocell 异构网络中实现 FBS 的子信道分配具有先天优势。

智能体寻找的最优策略是在状态  $s$  下, 选择的最优动作  $a$  可以使获得的立即回报  $r(a, s)$  与后继状态的折算  $V^*$  值的和最大。即

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \left[ r(a, s) + \gamma V^*(\delta(a, s)) \right] \quad (8)$$

其中,  $\delta(a, s)$  表示在状态  $s$  下执行动作  $a$  的结果状态。

Q-learning 采用 Q 函数作为评价函数。Q 函数值  $Q(a, s)$  的定义为: 从状态  $s$  开始, 执行第 1 个动作  $a$  的最大折算累积回报, 即 Q 值是在状态  $s$  下执行动作  $a$  后得到的立即回报与后续遵循最优策略得到的折算值的和。

$$Q(a, s) = r(a, s) + \gamma V^*(\delta(a, s)) \quad (9)$$

Q 函数是对智能体获得奖惩的一种预测, Q 值即为在状态  $s$  下根据最优策略选择动作  $a$  应该最大化的值, 重写公式(8)为

$$\pi^* = \arg \max_a Q(a, s) \quad (10)$$

下面分析非确定环境下 Q-learning 算法学习规则。在非确定性环境下, Q 值和  $V^*$  值可以定义为折算累积回报的期望值, 则可定义 Q 值的表达式为

$$Q(a, s) = E(r(a, s)) + \gamma \sum_{s'} P(a, s' | s) \max_{a'} Q(a', s') \quad (11)$$

其中,  $P(a, s' | s)$  是在状态  $s$  下执行动作  $a$  后转移到状态  $s'$  的概率。对于非确定性环境, 式(11)的更新法则并不能保证估计 Q 值收敛于实际的 Q 值, 因此需修改学习规则, 修改后的学习规则为

$$\begin{aligned} \hat{Q}_n(a, s) &\leftarrow (1 - \alpha) \hat{Q}_{n-1}(a, s) \\ &+ \alpha \left[ r + \gamma \max_{a'} \hat{Q}_{n-1}(a', s') \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\alpha = 1/(1 + v_n(a, s))$  称为学习率,  $v_n(a, s)$  是状态动作对  $(a, s)$  在  $n$  次学习重复的次数。该学习规则是用当前的估计 Q 值和修正的估计的一个衰减加权平均而得到的。并且文献[21]证明了该算法的收敛性。

在非确定环境中, 动作的选择不能总是选择使  $\hat{Q}(a, s)$  最大化, 因为, 如果每次学习都是选择使  $\hat{Q}(a, s)$  最大化的动作, 会使智能体被束缚于已经学习好的具有高 Q 值的动作中, 而无法探索到其他获得更大 Q 值的动作。在实际情况中通常使用玻尔兹曼分布的方式选择动作, 较高的 Q 值对应的动作会赋予较大的概率, 所有动作的概率都不为 0。具体更新动作概率的方法为

$$p(a | s) = \frac{\exp(\hat{Q}(a, s)/T)}{\sum_i \exp(\hat{Q}(a_i, s)/T)} \quad (13)$$

其中,  $T$  为退火温度参数,  $T$  越大则所有动作概率越趋于相等, 反之, 动作概率差异性越大。在一些实际情况中,  $T$  是随着学习次数而变化的, 使得智能体可以由探索最优策略转换到利用以前的策略。

为了消除 FBS 对 MBS 造成的跨层干扰, 宏蜂窝用户 MUE 和 MBS 以及 FBS 和 MBS 之间存在如下信息交互, MUE 将检测的 FBS 信息周期性的传递给 MBS, 然后 MBS 向 FBS 发送自组织信号, 即 MUE 周围的干扰基站信息, MBS 分配给 MUE 子信道信息(可以通过 X<sub>2</sub> 接口, 或空中接口实现), 如图 1 所示, 一个 MBS 覆盖 3 个 FBS, 每个 FBS 采用封闭式接入, MBS 控制其覆盖下的 FBS 不对 MUE 产生干扰。

### 3.1 基于 Q-learning 的子信道分配架构

为了利用 Q-learning 理论实现 Femtocell 异构网络中的子信道分配, 需首先设计智能体, 环境状态, 动作, 以及立即回报:

智能体: 即为所有 FBS  $b$ ,  $b \in \{1, 2, \dots, B\}$ 。

环境状态: 由于 MBS 已将 MUE 的位置信息以及已占用的子信道信息发送给各个 FBS,  $t$  时刻的状态为  $s_{bn}^t = (I_{bn}^t, M_0^t, C_{bn}^t)$ , 其中  $I_{bn}^t$  表示  $t$  时刻 FBS 是否将对 MUE 产生干扰, 若对 MUE 产生干扰, 则表示为 1, 否则为 0;  $M_0^t$  表示  $t$  时刻 FBS 将会干扰到的 MUE 数目,  $m \in \{1, 2, \dots, M_0^t\}$ , MBS 用户  $m$  所占用的子信道集合用  $M_{0,m}^t$  表示;  $C_{bn}^t$  表示  $t$  时刻在当前 Femtocell 中 FBS 分配给其他用户的子信道集合。前两个参量  $I_{bn}^t$  和  $M_0^t$  可通过 MUE 上传给 MBS 的检测信息得到。

动作: 用  $a_{bn}^t$  表示 FUE 可选择的动作, 则  $a_{bn}^t \in (C - C_{bn}^t)$ 。

立即回报:  $t$  时刻, 当 FBS  $b$  中用户  $n$  选择动作  $a_{bn}^t$  时, 只有在子信道  $a_{bn}^t = c$  上吞吐量  $r_{bn}^c$  发生了变化, 因此, 设计式(14)所述的立即回报函数:

$$w_{bn}^t(a_{bn}^t, s_{bn}^t) = -\frac{1}{\theta_{bn}} \ln \mathbb{E}(e^{-\theta_{bn} r_{bn}^c}) \quad (14)$$

根据文献[21]中 Q 值的定义, 在状态  $s_{bn}$  下的 Q 值是长期累积回报的和, 因此, Q 值定义为

$$Q(a_{bn}, s_{bn}) = w_{bn}(a_{bn}, s_{bn}) + \gamma \sum_{s_{bn} \rightarrow v_{bn}} p' Q(a_{bn}, v_{bn}) \quad (15)$$

式中,  $p'$  是由状态  $s_{bn}$  转移到下一状态  $v_{bn}$  的状态转移概率,  $\gamma$  是折扣因子。

Q-learning 相对于其他强化学习算法的一个明显优势就是在状态转移概率未知的情况下更新 Q 值, 具体迭代更新公式如式(16):

$$Q^t(a_{bn}, s_{bn}) = (1 - \alpha) Q^{t-1}(a_{bn}, s_{bn}) + \alpha [w_{bn}^t(a_{bn}, s_{bn}) + \gamma \max_{a'_{bn}} Q^{t-1}(a'_{bn}, v_{bn})] \quad (16)$$

式中,  $\alpha$  是学习率。为保证 Q-learning 算法的收敛性学习率  $\alpha$  需满足:  $\sum_{t=1}^{\infty} \alpha = \infty$ ,  $\sum_{t=1}^{\infty} \alpha^2 < \infty$ , 当  $t \rightarrow \infty$ ,  $Q^t(a_{bn}, s_{bn})$  将以概率 1 收敛于最优 Q 值  $Q^*(a_{bn}^*, s_{bn})$ 。

另外, FBS 在更新策略时根据玻尔兹曼探索的方式更新策略空间  $\pi^t = \{\pi^t(1 | s_{bn}), \pi^t(2 | s_{bn}), \dots, \pi^t(a_{bn} | s_{bn}), \dots, \pi^t(C_{sub} | s_{bn})\}$ , 具体地,  $t$  时刻的策略根据式(17)更新:

$$\pi^t(a_{bn} | s_{bn}) = \frac{\exp(Q^t(a_{bn}, s_{bn})/T)}{\sum_{a_{bn}=1}^{C_{sub}} \exp(Q^t(a_{bn}, s_{bn})/T)} \quad (17)$$

式(17)中,  $T$  为退火因子, ( $0 < T < 1$ ), 用户的策略空间的各个动作概率的差异,  $T$  的取值越小, 用户的策略空间的各个动作概率的差异越大, 本文取经验值 0.5。

### 3.2 基于 Q-learning 的子信道分配算法

考虑不同业务对网络吞吐量的需求差异, 不同用户需要的最低数据速率差异很大, 基于以上 Q-learning 框架, 本节提出具有数据速率 QoS 保障的基于 Q-learning 的子信道分配算法, 具体算法步骤为:

- 步骤 1 确定子信道集合  $C - C_{bn}$ , FBS 基站  $b$  中的用户集  $N_b$ ;
- 步骤 2 设定学习次数上限  $H_{max}$ ;
- 步骤 3 初始化 Q 值, 初始化时间  $t = 0$ 。
- 开始学习
- 步骤 4 更新时间  $t = t + 1$ ;
- 步骤 5 根据式(17)更新策略空间  $\pi^t$ ;
- 步骤 6 根据贪婪算法选择动作  $a_{bn}^t$ ;
- 步骤 7 根据式(14)计算立即回报  $w^t(a_{bn}^t, s_{bn}^t)$ ;
- 步骤 8 根据式(16)更新 Q 值  $Q^t(a_{bn}, s_{bn})$ ;
- 步骤 9 判断是否达到最大学习上限  $H_{max}$ , 若达到学习上限  $H_{max}$ , 则结束本次学习, 若未达到学习上限, 则返回步骤 4;
- 步骤 10 根据学习结果确定分配给 FBS 基站  $b$  中用户  $n$  的子信道;
- 步骤 11 根据式(6)计算用户  $n$  的有效容量  $E_{C,bn}(\theta_{bn})$ ;
- 步骤 12 判断用户  $n$  的有效容量  $E_{C,bn}(\theta_{bn})$  是否大于目标  $\bar{E}_{C,bn}$ , 若  $E_{C,bn}(\theta_{bn}) \geq \bar{E}_{C,bn}$ , 则结束学习, 若  $E_{C,bn}(\theta_{bn}) < \bar{E}_{C,bn}$ , 则返回步骤 1, 再为用户  $n$  分配其他子信道。
- 学习结束。

## 4 仿真配置与分析

在仿真中, 本文基于 Matlab 建立 Femtocell 异

构双层网络静态仿真系统,为了验证本文所提保证用户数据速率的基于 Q-learning 的子信道分配算法(QSA)的可行性,本文对 FBS 稀疏部署场景与 FBS 密集部署场景分别进行了仿真验证。

(1)FBS 稀疏部署场景如图 2 所示, MBS 基站位于网络中心,覆盖半径为 500 m,3 个(以 3 个为例进行说明)FBS 部署距离大于 100 m,信道是符合独立同分布的瑞利衰落信道,宏用户 MUE 和家庭用户 FUE 的路径损耗分别是  $kd^{-3}$  和  $kd^{-4}$ ,其中,  $d$  是收发信机之间的距离,  $k = 2 \times 10^{-4}$ ,其他仿真参数如表 1 所示,仿真结果以 FBS 1 为例进行说明,FBS 周围有两个 MUE,在 FBS 1 中有两个 FUE,FUE1 的最低数据速率要求是 100 kbit/s, FUE2 的最低数据速率要求是 300 kbit/s。根据所提算法进行子信道分配后的情况如表 2 所示。其中“0”表示该子信道未分配给该用户,“1”表示子信道已经分配给该用户。MUE 的子信道是已经分配好的,基于 Q-learning 的子信道分配算法完成后,FBS 1 将第 7 个子信道分配给 FUE 1,将第 2,3,6 个子信道分配给 FUE 2。该算法将除了分配给宏用户以外的其他信道{2,3,6,7}都分配给了 FBS1,这是因为在 FBS 稀疏部署场景中,例如在偏远乡村中,FBS 之间距离远,并且其发射功率较小,因此 FBS 之间的干扰可以忽略;即,FBS 在进行子信道分配时,不需要考虑其他 FBS 的影响,只需考虑是否对周围宏用户造成干扰。FBS1 将 1 个子信道分配给了 FUE1,3 个子信道分配给 FUE2,是由于两个用户的最低数据速率要求不同,FUE2 要求的最低数据速率较高因此分配的子信道数较多。

(2)FBS 密集部署场景如图 3 所示,与 FBS 稀疏部署不同之处在于 FBS 彼此相邻部署,FBS 之间的相互干扰不可忽略。在仿真中以 FBS1 和 FBS2 为例,FBS1 和 FBS2 周边有 1 个宏用户受到干扰,即 MUE2,另外,FBS1 中有两个家庭用户(FUE 1 和 FUE 2),它们的最低数据速率要求分别是  $\bar{E}_{C,11}$

表 1 仿真相关参数

MBS 半径	500m
FBS 半径	15m
子信道数目	8 个
高斯白噪声	-110 dBm
MUE 的信道增益	$kd^{-3}$
FUE 的信道增益	$kd^{-4}$
单个子信道的带宽	200 kHz
每个 FBS 中的用户数	[2,6]

表 2 FBS 稀疏部署场景下子信道分配结果

子信道(RB)	1	2	3	4	5	6	7	8
MUE 1	1	0	0	0	0	0	0	1
MUE 2	0	0	0	1	1	0	0	0
FUE 1	0	0	0	0	0	0	1	0
FUE 2	0	1	1	0	0	1	0	0

$= 100$  kbit/s 和  $\bar{E}_{C,12} = 300$  kbit/s, FBS2 中也有两个家庭用户,分别是 FUE A 和 FUE B,它们的最低数据速率要求分别是  $\bar{E}_{C,2A} = 100$  kbit/s 和  $\bar{E}_{C,2B} = 200$  kbit/s,其他仿真参数同样参见表 1。经过子信道分配得出结果如表 3 所示。分配给 FBS1 中两用户的子信道分别是  $C_{11} = \{2\}$ ,  $C_{12} = \{3,7,8\}$ ;分配给 FBS2 中两用户的子信道分别是  $C_{2A} = \{1\}$ ,  $C_{2B} = \{2,6\}$ 。两个 FBS 在进行子信道分配时不仅要考虑是否对宏用户产生干扰,同时也需要考虑 FBS 之间的相互干扰,所以 FBS2 没有将分配给 FUE2 的子信道分配给他所控制的家庭用户。仿真结果与理论分析相一致,证实了所提算法的可行性。

图 4 显示的是宏用户单个子信道上的平均有效容量随家庭小区数的变化趋势。从图中可以看出所提算法有效地保障了宏用户的吞吐量,随着家庭小区数目的增加,宏用户单个子信道上的平均有效容量略有减少,但宏用户的吞吐量不低于 250 kbit/s,

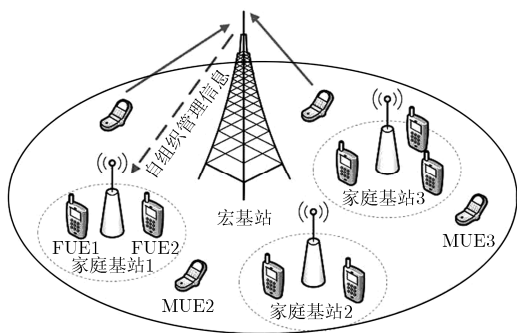


图 2 FBS 稀疏部署场景图

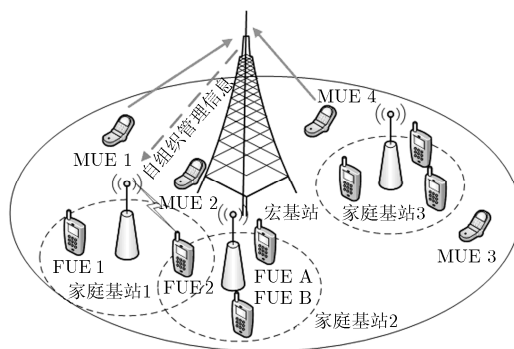


图 3 Femtocell 密集部署场景

这是因为 FBS 在分配子信道时与 MBS 有信息交互，可以保障家庭基站不对附近宏用户产生干扰，宏用户有效容量略微下降是因为，随着家庭基站数目的增多，家庭基站有可能会对远处宏用户产生轻微干扰。另外，从图 4 中也可以看到所提算法(QSA)的宏用户有效容量远远大于随机分配子信道(RSA)宏用户的有效容量，因为所提算法有效地避免了家庭基站对附近宏用户的干扰。

表 3 FBS 密集部署子信道分配结果

子信道(RB)	1	2	3	4	5	6	7	8
MUE 2	0	0	0	1	1	0	0	0
FUE 1	0	1	0	0	0	0	0	0
FUE 2	0	0	1	0	0	0	1	1
FUE A	1	0	0	0	0	0	0	0
FUE B	0	1	0	0	0	1	0	0

图 5 显示了家庭用户单个子信道的平均有效容量随统计时延指数的变化趋势，从图 5 中可以看出，家庭用户单个子信道的平均有效容量随统计时延指数的增加而降低，但是当时延指数较小时，即  $\theta < 10^{-3}$ ，FUE 有效容量变化不大，这是由于当时延指数很小时， $\theta$  对有效容量的影响很小，用户可获得的有效容量接近于香农容量， $\theta > 10^{-3}$  时，FUE 有效容量变化明显，因此，时延指数的有效设定可以保证不同用户对时延 QoS 指标的要求。另外，可

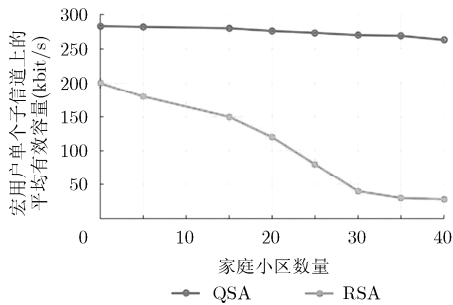


图 4 宏用户单个子信道的平均有效容量与家庭小区数的关系

以发现所提算法获得的平均有效容量远远大于随机分配子信道获得的有效容量，并且随着家庭小区数的增多，所提算法家庭用户单个子信道上的平均有效容量略有下降，而随机分配子信道算法的家庭用户单个子信道上的平均有效容量迅速下降，这是由于所提子信道分配算法有效地降低了家庭用户之间的同层干扰，从而获得更大的有效容量。

### 5 结束语

本文研究了在保障用户时延 QoS 和抑制用户对网络吞吐量不同要求指标的基础上研究了 Femtocell 异构双层网络中基于 Q-learning 的子信道分配策略。为了保障用户时延 QoS，本文首先基于有效容量的概念建立了 Femtocell 异构双层网络模型。再者考虑到家庭基站是随机接入网络，需要有自配置网络参数，自我优化的能力，因此，本文基于 Q-learning 理论建立 Q-学习框架，设计了基于 Q-learning 的子信道分配算法，在该算法中，每个家庭基站都是一个智能体，在分配子信道时既避免了 FBS 与 MBS 之间的跨层干扰，又降低了 FBS 之间的同层干扰，并且各家庭基站可根据用户对网络吞吐量不同需求自适应地分配子信道数目。最后，本文分别针对 FBS 稀疏部署与密集部署场景对所提算法进行了仿真验证，并与随机分配子信道算法进行对比，证实了所提算法的有效性、优越性。但本研究还有待完善的地方，例如子信道分配证明收敛性的问题，这也是下一步的研究方向。

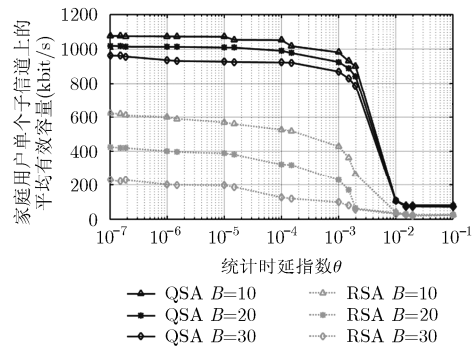


图 5 家庭用户单个子信道的平均有效容量与统计时延指数的关系

### 参考文献

[1] CHEN W T. Analytic estimation for uplink capacity reduction due to co-channel interference in LTE networks[J]. *Wireless Networks*, 2014, 21(6): 1775-1782. doi: 10.1007/s11276-014-0883-y.

[2] ALADE T, ZHU H, and WANG J. Uplink co-channel interference analysis and cancellation in femtocell based

distributed antenna system[C]. *IEEE International Conference on Communication (ICC) 2010, Cape Town, South Africa*, 2010: 1-5. doi: 10.1109/ICC.2010.5501848.

[3] MOHSEN M and MAJID G. Uplink scheduling in wireless networks with successive interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(5): 1132-1144. doi: 10.1109/TMC.2013.56.

- [4] VIKRAM C and JEFFREY J A. Spectrum allocation in tiered cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(10): 3059–3068. doi: 10.1109/TCOMM.2009.10.080529.
- [5] TSIROPOU E E, VAMVAKAS P, PAPAVALASSIOLIOU S, *et al* Combined power and rate allocation in self-optimized multi-service two-tier femtocell networks[J]. *Computer Communications*, 2015, 72(12): 38–48. doi: 10.1016/j.comcom.2015.05.012.
- [6] 杜晓玉, 孙力娟, 郭剑, 等. 异构无线传感器网络覆盖优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 696–702. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00730.  
DU Xiaoyu, SUN Lijuan, GUO Jian, *et al*. Coverage optimization algorithm for heterogeneous WSNs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 696–702. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00730.
- [7] LI Hongjia, XU Xiaodong, HU Dan, *et al*. Clustering strategy based on graph method and power control for frequency resource management in femtocell and MBS overlaid system[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2011, 13(6): 664–677. doi: 10.1109/JCN.2011.6157483.
- [8] HAN Bin, WANG Wenbo, LI Yong, *et al*. Investigation of interference margin for the co-existence of MBS and femtocell in orthogonal frequency division multiple access systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2013, 7(1): 59–67. doi: 10.1109/JSYST.2012.2223536.
- [9] GUVENC I, JEONG M R, WATANABE F J, *et al*. A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(12): 880–882. doi: 10.1109/LCOMM.2008.081273.
- [10] ZHENG K, WANG Y, LIN C, *et al*. Graph-based interference coordination scheme in orthogonal frequency-division multiplexing access femtocell networks[J]. *IET Communications*, 2011, 5(17): 2533–2541. doi: 10.1049/iet-com.2011.0134.
- [11] PARK S S, SEO W H, KIM Y J, *et al*. Beam subset selection strategy for interference reduction in two-tier femtocell networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3440–3449. doi: 10.1109/TWC.2010.092410.091171.
- [12] 张海波, 穆立雄, 陈善学, 等. OFDMA 毫微微小区双层网络中基于分组的资源分配[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 262–268. doi: 10.11999/JEIT150699.  
ZHANG Haibo, MU Lixiong, CHEN Shanxue, *et al*. A cluster-based resource allocation in a two-tier OFDMA femtocell networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 262–268. doi: 10.11999/JEIT150699.
- [13] CHANG Chihwen. An interference-avoidance code assignment strategy for the hierarchical two-dimensional-spread MC-DS-CDMA system: a prototype of cognitive radio femtocell system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(1): 166–184. doi: 10.1109/TVT.2011.2173808.
- [14] KANG Xin, LIANG Yingchang, and GARG H K. Distributed power control for spectrum-sharing femtocell networks using stackelberg game[C]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, Japan, 2011: 1–5. doi: 10.1109/icc.2011.5962650.
- [15] AHMED M and YOON S G. Dynamic access and power control scheme for interference mitigation in femtocell networks[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 2015, 9(11): 4331–4346. doi: 10.3837/tiis.2015.11.004.
- [16] JIN Fan, ZHANG Rong, and HANZO L. Fractional frequency reuse aided twin-layer femtocell networks: Analysis, design and optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(5): 2074–2085. doi: 10.1109/TCOMM.2013.022713.120340.
- [17] JIN Fan, ZHANG Rong, and HANZO L. Frequency-swapping aided femtocells in twin-layer cellular networks relying on fractional frequency reuse[C]. 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Paris, France, 2012: 3097–3101. doi: 10.1109/WCNC.2012.6214337.
- [18] SALATI A H, NASIRI-KENARI M, and SADEGHI P. Distributed subband, rate and power allocation in OFDMA based two-tier femtocell networks using fractional frequency reuse[C]. 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Paris, France, 2012: 2626–2630. doi: 10.1109/WCNC.2012.6214243.
- [19] VALCARCE A, LUCAS M, and LOPEZ-PEREZ D. In-cabin downlink cell planning with fractional frequency reuse[C]. 18th European Wireless Conference European Wireless, Poznan, Poland, 2012: 1–5.
- [20] WU Dapeng and NEGI R. Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(4): 630–643. doi: 10.1109/TWC.2003.814353.
- [21] WATKINS C and DAYAN P. Technical note: Q-Learning [J]. *Machine Learning*, 1992, 8(3/4): 279–292. doi: 10.1023/A:1022676722315.
- 杨秀清: 女, 1967 年生, 副教授, 研究方向为无线通信技术。  
陈禹: 男, 1977 年生, 讲师, 研究方向为移动通信技术与理论。  
李正富: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为未来移动通信网络。