

## Femtocell 网络中博弈式频率复用算法

周雄<sup>1</sup>, 冯穗力<sup>1</sup>, 丁跃华<sup>1</sup>, 张永忠<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510641; 2. 中国电子科技集团 第七研究所, 广东 广州 501310)

**摘要:** 提出了一种适用于 Femtocell 网络的博弈式频率复用算法。在 Femtocell 网络中, 首先 Femtocell 基站通过感知其无线环境选择临时子频带, 然后通过通过对分簇后的 Femtocell 网络执行簇内协调和簇间博弈两步算法, 消除相邻 Femtocell 之间的频谱冲突, 使 Femtocell 网络合理地复用频谱资源。在 Femtocell 随机部署的网络中, 该方法解决了 Femtocell 网络中的频谱冲突问题。仿真表明, 采用该算法后, Femtocell 网络的频谱冲突得到有效改善, Femtocell 系统平均信道容量明显提高。

**关键词:** Femtocell 网络; 频率复用; 频谱冲突; 相关均衡

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

## Game-theoretical frequency reuse algorithm in Femtocell network

ZHOU Xiong<sup>1</sup>, FENG Sui-li<sup>1</sup>, DING Yue-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yong-zhong<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2.No.7 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Guangzhou 501310, China)

**Abstract:** A game-theoretical frequency reuse algorithm has been proposed for Femtocell network. Firstly, each Femtocell tries to get an available sub-band by sensing its radio circumstance. Then, inner-cluster frequency collisions are avoided by implementing a negotiation mechanism. Lastly, each cluster is regarded as a game player to get the largest utility by using its optimal strategy. Despite Femtocell base stations are randomly installed by users, the proposed method performs well in Femtocell network. Simulation results show that frequency collisions are dramatically reduced and the average capacity of Femtocells is considerably enhanced.

**Key words:** Femtocell network; frequency reuse; frequency collision; correlated equilibrium

### 1 引言

目前有研究表明, 大约 2/3 的电话通信和 70% 以上的数据业务传输都发生在室内<sup>[1]</sup>。然而, 宏基站却难以满足室内用户对高速率、高质量通信的需求, 因此, 高效率、低功耗、小覆盖范围的 Femtocell 技术, 作为改善室内无线覆盖质量的解决方案获得了广泛关注。Femtocell 基站(FBS, femtocell base station)与宏基站共享授权频谱资源, 直接利用因特网连接实现回程传输, 能即插即用, 灵活性非常强<sup>[2]</sup>。Femtocell 技术的推广应用, 不仅能为用户提供更高质量的通信服务, 也能减少运营商的运营成本<sup>[3]</sup>。

因此, Femtocell 成为了下一代移动通信系统中的关键技术<sup>[4,5]</sup>。然而, 部署 Femtocell 也会带来新的干扰问题, 由于 FBS 通常由用户安装与维护, 难以进行统一的频谱资源规划分配, 使得 Femtocell 网络中的干扰管理问题十分复杂<sup>[6]</sup>。为了解决该问题, 研究人员已经提出了多种不同的频谱资源分配方法。

文献[7]研究了部分频率复用(FFR, fractional frequency reuse)算法在采用 OFDMA 技术的 Femtocell 系统中, 对共信道干扰的抑制效果, 在该文献讨论的场景中, FFR 算法能够有效克服 Femtocell 之间的共信道干扰。但是该文仅考虑了理想的 Femtocell 网络场景, 需假定相邻的 Femtocell

收稿日期: 2013-08-17; 修回日期: 2014-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61340035); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2012AA050801)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61340035); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA050801)

之间已经正交选择的子频带,然而在 FBS 随机部署的 Femtocell 网络中,该条件很难满足。文献[8]提出根据 FBS 的密度和位置,动态地配置 FFR 模式。但是该算法同样没有考虑 Femtocell 网络中可能存在的频谱冲突问题。针对 Femtocell 网络中资源分配的问题,目前有研究者尝试引入博弈论的方法,并在一些场景下取得了较好的效果。在文献[9]中,基于博弈的无线资源管理方案相比平均分配方式,取得了更好的效果,但是对于 Femtocell 网络中频谱冲突的问题还需进一步研究。对于认知 Femtocell 网络,文献[10]将 FBS 当作一个理性的次要用户,互相竞争频谱资源。但是自私的竞争方式一般难以取得整网最优的效果。文献[11]提出了一种合作的方法来降低干扰,以提高通信速率。但是该方法也没有涉及 Femtocell 网络中频谱资源不合理分配的调整问题。总之,目前针对 Femtocell 网络频谱资源分配的算法,都没有考虑 Femtocell 网络中的频谱冲突,均假设各个 FBS 与其相邻基站已经正交选择了子频带。然而,在 Femtocell 网络中,通常随机部署的 FBS 只能利用其有限的感知能力,获得小范围的无线环境信息,从而选择频谱方案。因此 Femtocell 网络容易出现频谱冲突的问题,如图 1 所示,图中不同灰度颜色表示不同的子频带。目前,在 Femtocell 网络中,如何有效解决频谱冲突带来的共信道干扰问题,仍然需要进一步研究。

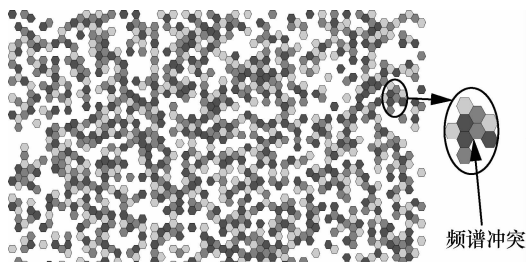


图1 Femtocell 网络中频谱冲突示意

针对这一问题,本文提出一种基于博弈的频谱复用方案。首先,在 FBS 初始化时,通过对其无线环境的感知,选择信道条件最好的子频带。然后, FBS 寻找合适的 Femtocell 簇,加入 Femtocell 簇后,通过簇内协调机制,完成簇内频谱调整,避免簇内 Femtocell 之间的频谱冲突。最后,各个簇作为理性的博弈单元,为最大化全簇利益进行博弈,选择能最大化全簇信道容量的频谱使用方案,从而提高 Femtocell 网络的通信服务能力。该方法将大幅减小

Femtocell 网络由于频谱资源分配不合理而带来的同频干扰,使得相邻 Femtocell 间正交地复用频谱,提高网络中 Femtocell 的信道容量。

## 2 系统模型

在由宏基站与 FBS 组成的双层分级蜂窝网中,通常在一个宏基站的有效覆盖范围内,有大量由用户购买并安装的 FBS,并且 FBS 的位置有一定的随机性<sup>[12]</sup>,如图 2 所示。虽然 FBS 分布于宏基站的覆盖范围内,但是宏基站不干预 FBS 之间的自组织行为,宏基站与核心网连接,而 FBS 一般通过因特网进行回程传输。宏基站与 FBS 需要共享注册频谱资源,为了集中于 Femtocell 之间的频谱复用问题,本文考虑宏基站与 FBS 之间使用异频组网的方式,暂不考虑宏基站与 FBS 之间的同频干扰问题。

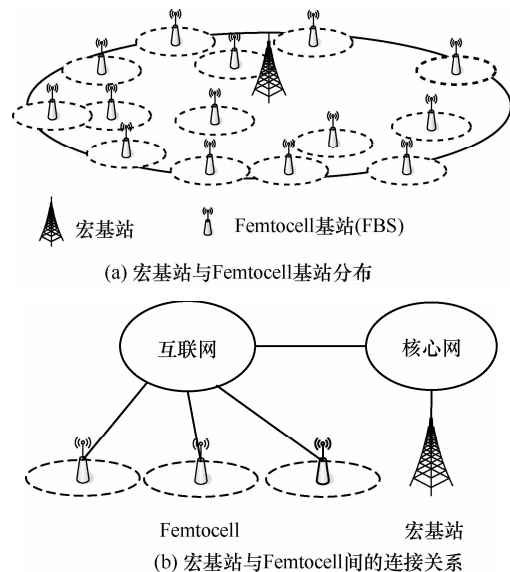


图2 宏基站与 Femtocell 基站分布与逻辑关系

蜂窝网在采用频率复用算法时,一般将总频谱划分为  $K$  个子频带,每个小区占用一个子频带,  $K$  称为频率复用因子<sup>[13]</sup>。在 Femtocell 网络中,当频率复用因子  $K$  足够大时,各个 FBS 根据其局部感知结果,就能消除相邻 FBS 之间的频谱冲突,但与此同时,每一个 FBS 获得的带宽会相应减小, FBS 的容量可能反而会减小,因此不能简单地通过增大  $K$  来消除相邻 Femtocell 间的频谱冲突。

在 FBS 现有的回程连接架构和管理模式下,很容易实现 Femtocell 网络局部小范围的自组织功能,并且 FBS 扩展的认知功能也会增强 Femtocell 网络的自组织能力<sup>[14]</sup>。因此,假设 Femtocell 网络可以

通过自组织的方式,组合成多个 Femtocell 簇。每个簇包含一个簇头成员和若干普通成员,并且簇头成员与每一个普通成员是相邻的,如图3所示。在实际系统中,这种簇结构对应于簇头 Femtocell 与其邻居小区。在本文中,簇头主要负责收集其他簇成员的感知信息,选择博弈过程中本簇的最佳策略,并通知簇成员执行该策略。普通簇成员则主动避免使用簇头选择的子频带,作为对簇头成员的激励。由簇头及其邻居小区形成的簇结构,能够有效地实现相互感知、信息汇总与决策通知等功能。

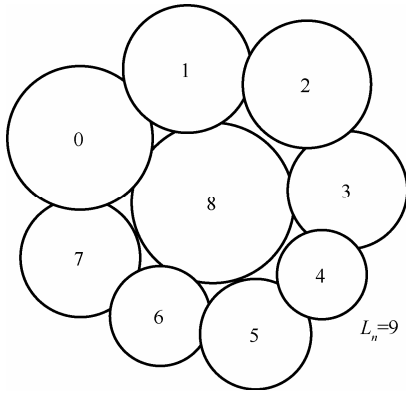


图3 Femtocell 簇及簇成员编号示例

假定簇  $n$  中含有  $L_n$  个成员,令  $i$  为 Femtocell 编号。簇头编号为  $L_n - 1$ ,将边缘 Femtocell 按照相邻关系,从 0 到  $L_n - 2$  的顺序依次编号,即 Femtocell  $i$  与 Femtocell  $i + 1 \pmod{L_n - 1}$  相邻,如图3所示。采用这种编号方式,是为方便描述本文所提算法,在实际应用中,并不需要对 FBS 进行编号。令  $f_i$  表示 Femtocell  $i$  选择的子频带,在理想的情况下,相邻 Femtocell 需要正交地使用子频带,即满足如下条件

$$f_i \neq f_{i+1 \pmod{L_n - 1}} \quad (1)$$

$$f_{L_n - 1} \neq f_i, i \neq L_n - 1 \quad (2)$$

在 Femtocell 网络中,簇  $n$  中 Femtocell  $i$  对于用户  $m$  在子频带  $k$  处的信干噪比如下

$$SINR_{n,i,m,k} = \frac{P_{n,i,m,k} G_{n,i,m,k}}{I + \delta \Delta f} \quad (3)$$

$$I = \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_j P_{n',j,k} G_{n',j,m,k}, j \neq i, i, n' = n$$

其中,  $n$  与  $n'$  代表 Femtocell 簇编号,  $N$  是网络中 Femtocell 簇的总数,  $i$  和  $j$  代表 Femtocell 编号,  $m$  代表用户设备(UE, user equipment)编号,  $k$  代表子频带编号,  $P_{n,i,m,k}$  代表 Femtocell 簇  $n$  中 Femtocell  $i$

对 UE  $m$  在子频带  $k$  上的发送功率,  $G_{n,i,m,k}$  代表簇  $n$  中 Femtocell  $i$  与 UE  $m$  之间在频带  $k$  上的信道增益,  $P_{n',j,k}$  与  $G_{n',j,m,k}$  分别是来自其他小区的同频干扰信号功率与相应的信道增益,  $\delta$  为高斯白噪声功率密度,  $\Delta f$  代表子频带带宽。在频谱资源的分配管理中主要考虑传输路径损耗带来的影响,本文采用 ITU-R P.1238<sup>[15]</sup>建议的室内信号衰落模型

$$L_{\text{TN}}(r) = L_{50}(r) + L_{\text{FM}} + L_W \quad (4)$$

其中,  $L_{\text{FM}}$  为阴影衰落损耗,  $L_W$  为建筑物外墙穿透损耗。根据文献[15]的建议,假设  $L_{\text{FM}} = 7.7$  dB,  $L_W = 0$  dB。根据传输距离  $r$  变化的主路径损耗  $L_{50}(r)$  为

$$L_{50}(r) = 20 \lg f_c + 10 \lambda \lg r + L_f(n_f) - 28 \quad (5)$$

其中,  $f_c$  为载波频率,  $\lambda$  为室内路径损耗指数,  $L_f(n_f)$  为地板穿透损耗,  $n_f$  为穿透的楼层数量。对应于  $SINR_{n,i,m,k}$ , 簇  $n$  中 Femtocell  $i$  与 UE  $m$  在频带  $k$  上的信道容量  $C_{n,i,m,k}$  为

$$C_{n,i,m,k} = \Delta f \lg(1 + \alpha SINR_{n,i,m,k}) \quad (6)$$

$$\alpha = -1.5 / \ln(5BER) \quad (7)$$

其中,  $\alpha$  为接收端误比特率(BER, bit error rate)门限决定的常数,为满足实际通信系统需要,将 BER 门限设定为  $10^{-6}$ 。

### 3 博弈式频率复用算法

Femtocell 是低功耗、小范围的无线覆盖技术, Femtocell 网络中有可能包含大量的 Femtocell, 此时网络覆盖区域远大于单个 FBS 的感知范围。随机新启动的 FBS 只能根据其局部感知结果选择临时子频带,这就可能出现与邻居小区使用同一子频带的情形,导致这些小区内存在严重的同频干扰,因此必须进行调整,使得相邻小区间尽可能正交地使用子频带,这样才能保证整网有较高的信道容量。

由于 FBS 可由用户购买并安装,其分布有较大的随机性。此时,采用集中式整网大范围协调的频谱资源的分配方法代价高且可操作性低,所以需要研究分布式的自组织方法。虽然 Femtocell 网络的全局协调难以实现,但是 Femtocell 簇的规模相对较小,簇内可以采用合作协调的方法。因此, Femtocell 网络的频谱资源分配,可由 FBS 通过局部感知信息初始化其临时子频带,然后进行簇内与

簇间两步调整,以消除频谱冲突,即首先通过 Femtocell 局部感知簇内无线环境信息进行簇内协调,消除簇内相邻 Femtocell 间的频谱冲突。然后,将每个 Femtocell 簇看作是一个理性的博弈单元,争取该簇的利益最大化,尽可能地消除整网存在的频谱冲突,从而完成整个 Femtocell 网络的频谱调整,增大 Femtocell 网络的整网容量。

### 3.1 簇内协调

在 Femtocell 网络中可以通过自组织形成各个相对独立的簇<sup>[16]</sup>。普通簇成员根据其感知信息,避免使用簇头正在使用的子频带,并检测是否和其他邻居节点产生频谱冲突。当某个 Femtocell 检测到频谱冲突后,将通过与其相邻 Femtocell 协调,以消除频谱冲突,一次簇内协调的具体流程如图 4 所示,簇内每一个边缘 Femtocell 均周期性地执行该算法。

如图 4 所示,当某个 Femtocell 感知到频谱冲突后,如果该 Femtocell 没有收到邻居节点的协调请求,则将其邻居节点发起请求。对与该 Femtocell 使用相同子频带的邻居节点,发送请求

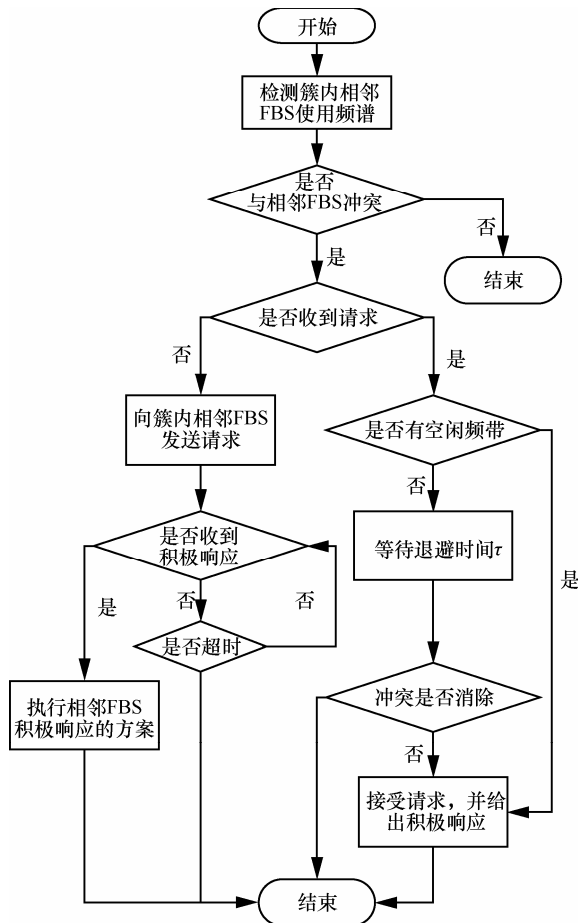


图 4 簇内相邻 Femtocell 间的协调机制

$R=0$ , 要求其另选其他子频带; 对与该 Femtocell 使用正交的子频带邻居节点, 发送请求  $R=1$ , 请求与其交换子频带。该 Femtocell 只有在收到邻居给出的积极响应之后, 才执行相应请求的方案, 即等待邻居节点另选子频带 ( $R=0$ ) 或者与邻居节点交换使用子频带 ( $R=1$ )。对于被请求的 Femtocell, 若其感知有其他可用子频带, 则立刻给出积极响应, 否则等待一个随机的退避时间  $\tau$ , 若退避过后仍然存在频谱冲突, 则对请求发起小区给出积极响应, 执行相应请求调整方案。随机退避时间  $\tau$  将使得相邻 Femtocell 之间的频谱调整不会存在乒乓效应, 并且所有发生频谱冲突的 Femtocell 能基本均等地得到交换机会。

### 3.2 簇间博弈

当簇内协调完成之后, 簇间仍然有可能存在频谱冲突, 仍需要进一步调整, 使得整网频谱资源的分配更加合理。当 Femtocell 簇内频谱冲突消除后, 已经完成了簇内频谱的正交分配。考虑到 Femtocell 网络规模较大, Femtocell 簇数量较多, 簇与簇之间的合作博弈可操作性较低。簇间的非合作博弈方式更适合实际的应用场景。Femtocell 簇可以参考簇内各个 Femtocell 在不同子频带上的干扰水平, 选择最佳的簇内频谱分配策略。

记 Femtocell 簇集合为  $\{0, 1, \dots, n, \dots, N-1\}$ 。在博弈论中, 将参与者可供选择策略的集合定义为策略空间, 令簇  $n$  的策略空间为  $Q_n$ , 在本文场景中, 簇  $n$  的策略空间是该簇可行频谱分配方式的集合。则整网的频谱选择策略组合可以表示为  $S = (s_0, s_1, \dots, s_n, \dots, s_{N-1})$ , 其中  $s_n$  为簇  $n$  选择的频谱策略。通常簇  $n$  之外的其他簇标记为  $-n$ , 因此  $S$  可以表示为  $S = (s_n, s_{-n})$ 。同时定义策略组合  $S$  中簇  $n$  的效用函数为  $U_n(S)$ , 在本文讨论的问题中, 效用函数就是簇内的总信道容量

$$U_n(s) = \sum_{i=0}^{L_n-1} C_{i,n} \quad (8)$$

其中,  $C_{i,n}$  是 Femtocell  $i$  在当前工作子频带上可获得的信道容量。任一簇  $n$  为获取全簇最大化的收益, 在进行频谱分配策略选择时, 会理性地选择策略  $s_n^*$ , 使得  $\forall s_n \in Q_n$ , 有

$$U_n(s_n^*, s_{-n}^*) \geq U_n(s_n, s_{-n}^*) \quad (9)$$

也就是每一个 Femtocell 簇均理性地选择频谱使用方案, 使得本簇能够获得最大化的总信道容量。

Femtocell 簇选择最佳频谱使用策略的具体流程如图 5 所示, 簇内成员均参与, 不同簇之间独立地执行。该算法在簇内周期性的执行, 为避免相邻 Femtocell 簇之间频谱调整出现乒乓现象, 在执行频谱调整时, 可以引入一个随机的退避时间  $\gamma$ 。

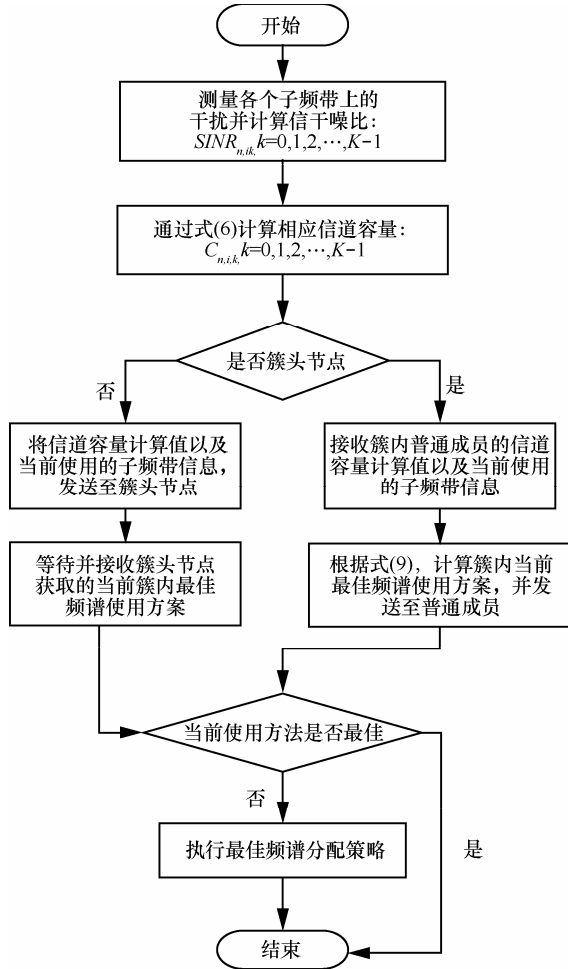


图 5 簇间非合作博弈算法流程

根据图 5 描述, 在 Femtocell 网络中, 簇中  $n$  每一个成员 Femtocell  $i$  均可在测量时隙, 对每一个子频带  $k$  上的干扰进行测量, 并计算信干噪比  $SINR_{n,i,k}$ , 获得相应的信道容量  $C_{n,i,k}$ 。然后 Femtocell  $i$  将这  $K$  个计算结果以及当前使用的子频带信息发送到簇头节点。簇头节点可根据式(9)选择最佳频谱分配方案, 并通知每个簇成员执行。在总共  $K$  个子频带的网络中, Femtocell 簇内频谱冲突消除后, 簇内 Femtocell 分成了  $K$  组, 相互正交地使用子频带, 簇中的可选频谱策略有  $A_K^K = K!$ 。由于子频带数量增多, 频谱利用率会降低, 因此  $K$  通常比较小, 在蜂窝通信系统中, 通常采用  $K = 3$ 。因

此, 簇头节点在选择满足式(9)的最佳策略时, 遍历法即可快速搜索出最佳簇内频谱分配策略。

## 4 算法性能分析

### 4.1 簇内协调机制的收敛性

簇内的边缘 Femtocell 避免了与簇头节点使用相同子频带, 协调均在相邻的边缘 Femtocell 之间进行。当边缘 Femtocell  $i$  检测到频谱冲突时, 会存在 3 种频谱冲突情形

$$f_i = f_{i-1(\text{mod } L_n-1)}, f_i \neq f_{i+1(\text{mod } L_n-1)} \quad (10)$$

$$f_i \neq f_{i-1(\text{mod } L_n-1)}, f_i = f_{i+1(\text{mod } L_n-1)} \quad (11)$$

$$f_i = f_{i-1(\text{mod } L_n-1)}, f_i = f_{i+1(\text{mod } L_n-1)} \quad (12)$$

其中, 式(10)与式(11)表示 Femtocell  $i$  与簇内一个邻居小区共用了相同子频带, 式(12)表示 Femtocell  $i$  与簇内 2 个相邻小区都产生了频谱冲突。令  $f'_i$  表示一次簇内协调完成后 Femtocell  $i$  使用的子频带,  $q$  与  $q'$  分别表示协调前与协调后簇中频谱冲突数量。对于式(10)所示的情况, 协调成功后, 可能出现如下结果

$$q' = \begin{cases} q & , f'_{i+1(\text{mod } L_n-1)} = f_{i+2(\text{mod } L_n-1)} \\ q-1 & , f'_{i+1(\text{mod } L_n-1)} \neq f_{i+2(\text{mod } L_n-1)} \end{cases} \quad (13)$$

$$q' = \begin{cases} q & , f'_{i-1(\text{mod } L_n-1)} = f_{i-2(\text{mod } L_n-1)} \\ q-1 & , f'_{i-1(\text{mod } L_n-1)} \neq f_{i-2(\text{mod } L_n-1)} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)表示请求  $R = 1$  被执行, Femtocell  $i$  与邻居节点 Femtocell  $i + 1(\text{mod } L_n - 1)$  交换了子频带。式(14)表示请求  $R = 0$  被执行, 邻居节点 Femtocell  $i - 1(\text{mod } L_n - 1)$  另选其子频带。事实上, 式(11)与式(10)代表的冲突情况是相同的, 因此得到的结果也是一致的。而对于式(12)中的频谱冲突情形, 当  $K \geq 3$  时, Femtocell  $i$  必定有其他可用频谱选择, 因此有

$$q' = q - 2 \quad (15)$$

综上所述, 一次协商完成后, 簇内的频谱冲突数量不会增加, 只可能会减少或者保持不变。因此, 经过多次协商之后, 簇内的频谱冲突可以减少到最小, 这一点通过仿真已经得到了验证。

### 4.2 簇间博弈的相关均衡

对于包含有限个成员的簇  $n$ , 每个簇都包含有限个可选策略, 因此存在混合策略的纳什均衡<sup>[17]</sup>。而在本文中, 该纳什均衡可以演进为相关均衡, 相关均衡结果是纳什均衡的一般化<sup>[18,19]</sup>。

在  $N$  个簇参与的博弈中，每一个簇  $n$  都试图最大化自己的收益  $U_n(S)$ 。由于各个簇只能控制自己的策略，因此最优策略将依赖于对其他簇采取的策略的理性分析。相关均衡可以直观地理解为，所有簇都可以从一个可信任的第三方获得最佳策略信息，每个簇根据这些信息，选择最大化自己利益的最佳策略<sup>[10]</sup>。因此，当每一个博弈参与成员都可以独立获得最大化自己利益的策略时，纳什均衡就演进为相关均衡。本文所涉及的博弈中，簇  $n$  中的成员 Femtocell 通过测量与计算，得到相应信道容量，并由簇头选择出最佳策略，因此簇  $n$  独立地获得其需要的最佳策略，从而 Femtocell 网络可以达到相关均衡。仿真结果表明采用本文算法，Femtocell 网络经过多次簇间博弈后，可以达到稳定的均衡点，网络的平均信道容量得到了有效提高。

## 5 仿真结果与分析

本文对不同规模的 Femtocell 网络进行了仿真。在各个 FBS 启动阶段，根据其邻居的频谱使用情况，选择空闲频谱，当没有可用频谱时，则将被迫与其邻居小区共享相同子频带。系统总频谱带宽为 3 MHz，路损模型参数参考文献[15]推荐值：室内路径损耗指数  $\lambda = 2.8$ ， $n_f = 0$ ， $L_f(n_f)$ ，载波频率  $f_c = 2$  GHz。考虑到不同 FBS 可能不再同一建筑物内，因此在各个 Femtocell 之间引入墙体穿透损耗，并按照居民楼穿透损耗推荐值取为 4 dB。各个 FBS 采用相等的发射功率。

图 6 给出了 Femtocell 网络采用不同频率复用因子  $K$  时，网络中的平均小区容量。一般地，子频带数量的增加可以缓解 Femtocell 网络中的频谱冲突，降低小区间的共信道干扰，但同时会减少每个 Femtocell 获得的带宽，从而降低每个 Femtocell 的信道容量。从图 6 可以看出，随着子频带数量  $K$  增大，平均每个 Femtocell 获得的信道容量降低。 $K > 3$  时，即使在频谱资源理想分配的情形下，平均信道容量也低于  $K = 3$  时本文算法的结果。而  $K < 3$ ，理论上已经不可能消除 Femtocell 网络中的频谱冲突。因此，采用  $K = 3$  仿真对比了本文算法与其他算法的性能。

图 7 列出了每个簇消除簇内频谱冲突所使用的协调次数统计结果。图 7 结果验证了簇内协调机制的收敛性以及收敛的快速性，从中可以看出，超过 90% 以上的簇可以在 3 次协调后，解决了簇内频谱冲突，该算法有较好的收敛速度。

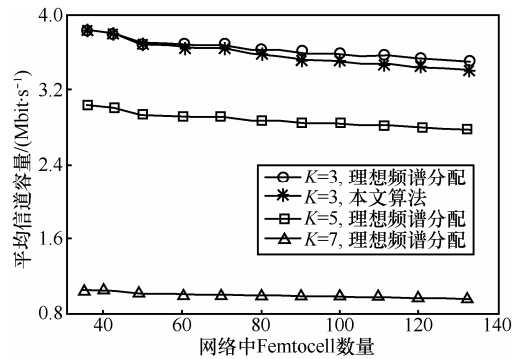


图 6 不同子频带数量时平均信道容量

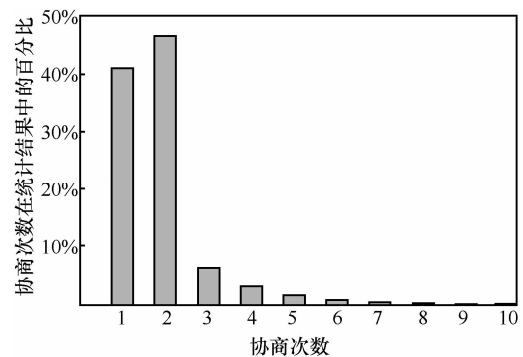


图 7 簇内协调次数统计结果

图 8 给出了 Femtocell 网络内，网络达到稳定平衡前，每个簇的平均调整次数。严格来说，Femtocell 网络达到稳定平衡需要簇间调整的次数与网络的规模有关。但本文提出的簇间博弈机制是分布式并行执行的算法，并且每一个簇是通过感知网络中其他 Femtocell 对本簇的干扰水平，选择簇内最佳频谱分配方案。因此，簇间博弈次数较少，Femtocell 网络可以较快地达到稳定的均衡点。

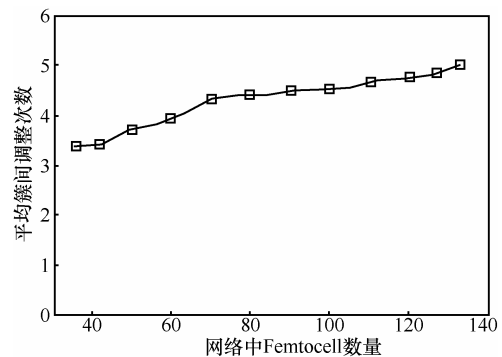


图 8 平均簇间调整次数

图 9 描述了不同算法应用于 Femtocell 网络时获得的平均 Femtocell 信道容量，其中，仿真参数  $K = 3$ 。为突出本文算法性能，给出了理想规划下，即有人工网络规划与优化，保证相邻 Femtocell 严格正交复用

频谱资源时<sup>[13]</sup>, Femtocell 网络中各个小区的平均信道容量作为参考。FFR 算法直接应用于 Femtocell 网络, 而不采取任何频谱冲突解决方案时, 会产生严重的频谱冲突现象, 获得的平均信道容量最小。采用单个 Femtocell 自私博弈的算法, 信道容量只有小幅度的改善。本文算法则大幅度提高了平均信道容量, 并且接近于理想频谱分配情况的信道容量。

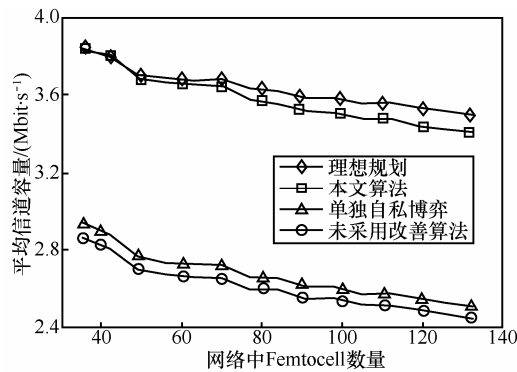


图9 不同网络规模下 Femtocell 平均信道容量

## 6 结束语

Femtocell 网络难以进行网络规划, 现有的频谱资源分配方案, 容易产生相邻 Femtocell 间的频谱冲突。本文提出的博弈式频率复用算法, 在 Femtocell 网络通过自组织分簇后, 采用簇内协调和簇间博弈两步算法, 使得 Femtocell 网络合理地选择频谱分配方案, 消除频谱冲突, 大幅提高了 Femtocell 网络的信道容量。

### 参考文献:

- [1] ZHANG J, GUILLAUME D L R. Femtocells Technologies and Deployment[M]. 1st ed, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2010.1-15.
- [2] ANDREWS J G, GATHERER A. Femto networks: a survey[J]. IEEE Commun Mag, 2008, 46(9):59-67.
- [3] TILLER A. The Case for Femtocells[M]. The Basestation e-Newsletter, 2007.50-100.
- [4] 3GPP TS 36.300 V10.3.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN)[S].
- [5] IEEE Std 802.16-2009. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access System[S].
- [6] SAQUIB N, HOSSAIN E, LONG B L. Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches[J]. Wireless Communications, IEEE, 2012, 19(3): 86-95.
- [7] LEE P, LEE T, JEONG J. Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse[A]. The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)[C]. 2010. 1047-1051.
- [8] JUANG R T, TING P, LIN H P. Interference management of femtocell in macro-cellular networks[A]. Wireless Telecommunications Symposium (WTS)[C]. 2010. 1-4.
- [9] LIEN S Y, LIN Y Y, CHEN K C. Cognitive and game-theoretical radio resource management for autonomous femtocells with QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7): 2196-2206.
- [10] HUANG J W, KRISHNAMURTHY V. Cognitive base stations in lte/3gpp femtocells: a correlated equilibrium game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(12): 3485-3493.
- [11] PANTISANO F, BENNIS M, SAAD W, et al. Interference alignment for cooperative femtocell networks: a game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(11): 2233-2246.
- [12] 肖竹, 李仁发, 易克初等. 两层异构网络中 Femtocell 研究进展与展望[J]. 通信学报, 2013, 32(2): 156-169.
- [13] XIAO Z, LI R F, YI K C, et al. Development and prospect of research on femtocell in two-tier heterogeneous networks[J]. Journal on Communications, 2013, 32(2): 156-169.
- [14] 纪越峰. 现代通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [15] JI Y F. Modern Communications Technology[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002.
- [16] ATTAR A, KRISHNAMURTHY V, GHAREHSHIRAN O N. Interference management using cognitive base-stations for UMTS LTE[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(8): 152-159.
- [17] SAUNDERS S, CARLAW S, GIUSTINA A, et al. Femtocells: Opportunities and Challenges for Business and Technology[M]. Wiley, 2009.
- [18] ZHOU X, FENG S, DING Y, et al. Game-theoretical frequency reuse method for complex cognitive femto-cell network[A]. 2013 8th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)[C]. 2013. 318-322.
- [19] NASH J F. Equilibrium points in  $N$ -person games[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1950, 36(1):48-49.
- [20] AUMANN R J. Subjectivity and correlation in randomized strategies[J]. Mathematical Economics, 1974: 67-96.
- [21] AUMANN R J. Correlated equilibrium as an expression of Bayesian rationality[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1987, 55(1):1-18.

### 作者简介:



周雄 (1988-), 男, 湖南长沙人, 华南理工大学博士生, 主要研究方向为 Femtocell 网络、异构网络资源分配与干扰管理、博弈论等。

冯穗力 (1955-), 男, 广东梅州人, 博士, 华南理工大学教授, 主要研究方向为宽带无线通信网络、信号处理等。

丁跃华 (1982-), 男, 湖南益阳人, 华南理工大学讲师, 主要研究方向为阵列信号处理、MIMO/OFDM 通信系统中发射功率分配及信号接收检测、家庭基站网络等。

张永忠 (1970-), 男, 安徽寿县人, 中国电子科技集团第七研究所高级工程师, 主要研究方向为无线接入网络。