

# 基于不完美频谱感知的认知 Femtocells 资源分配算法研究

孙 艳<sup>1</sup>, 彭代渊<sup>1</sup>, 梁宏斌<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 611756)

**摘要:**针对 Macrocell-Femtocell 同频异构网络中基于资源分配的干扰抑制问题,将 Femtocell 与认知无线电技术有效地结合在一起,提出一种新的基于不完美频谱感知的认知 Femtocell 网络资源分配算法。算法在满足认知家庭用户的服务质量,保证宏用户通信质量不受影响前提下,联合子信道与功率分配,最大化认知 Femtocell 网络系统容量。仿真证明认知型 Femtocell 相比于传统型 Femtocell 可以获得更高的家庭基站网络系统容量,并且性能超过约 15%;同时,算法中宏基站用户受到的平均跨层干扰比基于完美频谱感知的算法的低,而且不会高于跨层干扰限制。

**关 键 词:**家庭基站;认知无线电;频谱感知;资源分配

**中图分类号:**TP393.09

**文献标志码:**A

## 0 引言

LTE/LTE-A(long term evolution/LTE-advanced)系统中,大量使用频谱资源的高频段。由于高频段信号对建筑物的穿透性比较差,在穿越墙壁等建筑物时其信号的衰减程度比低频段信号严重,导致系统室内覆盖弱区、盲区增多。在传统宏蜂窝(Macrocell)网络中部署多个家庭基站(Femtoell)而成的两层 Femtocell 网络能够有效改善传统 Macrocell 网络的室内覆盖,提高网络容量<sup>[1]</sup>。目前由于频率资源紧缺,Femtocell 与 Macrocell 采用同频组网方式部署。而同频组网方式中,近距离强信号抑制远距离弱信号产生的“远近效应”使得 Femtoell 给 Macrocell 带来严重的跨层干扰问题,影响宏用户 MU(Macrocell users)的通信质量<sup>[1-2]</sup>。两层 Femtocell 网络的干扰问题日益突出,会大大降低两层 Femtocell 网络的性能。因此,有必要对 Femtocell 基站的干扰管理问题展开研究。

与传统宏蜂窝网络不同,Macrocell-Femtocell 两层网络中的干扰主要可以分成 3 类:Macrocell 对 Femtocell 的干扰;Femtocell 对 Femtocell 的干扰;Femtocell 对 Macrocell 的干扰。其中第一类和第三类干扰称之为跨层干扰 CTI(cross-tier interference),第二类干扰称之为同层干扰(co-tier interference)。两层 Femtocell 网络的性能主要受跨层干扰的影响,同层干扰由于 Fem-

tocell 低发射功率、低穿透损耗的特点,可以视作热噪声的一部分,可以被合理忽略<sup>[3]</sup>。跨层干扰使两层 Femtocell 网络中的 Macrocell 原有 MU 的通信质量受到家庭用户 FU(Femtocell users)的严重影响。MU 不应受到 FU 影响,其原因主要有:(1)Macrocell 基站属于 MU 可以随时随地接入的基础设施,尤其是对于移动用户和没有热点接入的“孤立”用户;(2)每一个 Macrocell 基站服务的用户数量远大于一个 Femtocell 基站服务用户数量;(3)Femtocell 基站部署的所有者一般是“自私”的,不允许其他用户接入<sup>[4-5]</sup>。其中第一个原因是最重要的。所以应当制定一种合适的资源分配算法,抑制 Femtocell 对 Macrocell 的跨层干扰,最大限度地提高两层 Femtocell 网络系统的性能,同时保护 MU 的通信质量不受 Femtocell 的影响。

认知无线电技术 CR(cognitive radio)是一种新兴技术,利用频谱感知技术、频谱共享技术以及温度干扰技术,能够有效改善 Femtocell 频谱接入质量,提高 Femtocell 频谱利用率<sup>[6-7]</sup>。文中构建一个认知 Femtocell 系统,认知 FU 通过认知 Femtocell 基站接入点 FBS(Femtocell base station),“伺机”地接入 Macrocell 授权频谱。

对于认知 Femtocell 系统,结合 OFDMA 正交频分多址接入技术,通过有效的资源分配及干扰抑制,能够改善异构蜂窝网络中 Macrocell 基站的覆盖问题,缓解 Macrocell 基站流量负担。但是,在实际认知无线通信网络中完美的频谱感知是很难实现的。而在认知 Femtocell 中,基于不完美频谱感知的,联合子信道和

功率分配的算法,抑制 Macrocell-Femtocell 系统的跨层干扰,还没有得到很好地研究。

基于以上讨论,研究基于 OFDMA 的认知 Femtocell 网络系统中,在满足 FU 的服务质量 QoS (quality of service) 需求、保护 MU 的通信质量不受影响的前提下,基于不完美频谱感知的联合子信道与功率分配算法。其中通过认知无线电技术中的干扰温度技术抑制跨层干扰,保护 MU 的通信质量。

## 1 认知 Femtocell 系统模型

研究基于 OFDMA 的认知 Femtocell 系统中行链路的资源分配问题。系统中,一个主 Macrocell 基站给  $M$  个 MU 传输信号,  $F$  个认知 Femtocell 基站,每个认知 Femtocell 基站给  $H$  个认知 FU 提供服务。其中认知 Femtocell 基站随机部署在主 Macrocell 基站覆盖范围内,认知 Femtocell 基站接入方式为封闭式 (closed), 认知 FU 使用 Overlay 模式 (见缝插针式) 接入 MU 的空闲频段。OFDMA 系统总带宽为  $B$ , 分成  $N_{total}$  个正交子信道,每个子信道带宽为  $\Delta f = B/N_{total}$ , 每个子信道模型为瑞利平坦衰落,包括路径损耗。系统模型如图 1 所示 (假设宏小区和 Femtocell 小区都处于上行传输阶段)。

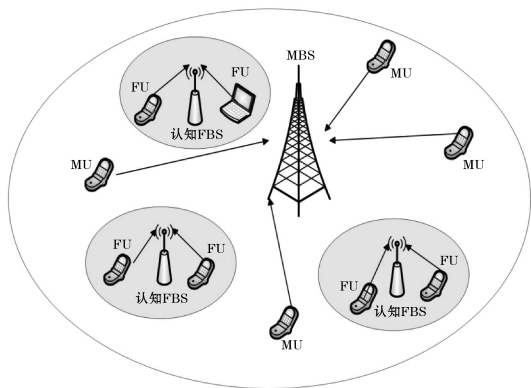


图 1 认知 Femtocell 系统模型

在认知 Femtocell 系统中,认知 FU 使用基于能量检测的频谱感知技术,在频谱感知周期的信号检测时间段内检测  $N_{total}$  个子信道的状态,每个决策时间段结束时,认知 Femtocell 基站综合每个 FU 感知信号结果做出最优决策,判定每一个子信道是否空闲。在  $N_{total}$  个子信道中决策出空闲子信道集  $S = 1, 2, \dots, N$  ( $N < N_{total}$ )。对于空闲子信道集  $S$  中的每一个子信道,最多被一个 FU 使用。令  $\varepsilon_{i,v,s}$  表示子信道分配系数,  $\varepsilon_{i,v,s} \in \{0, 1\}$ ,  $\varepsilon_{i,v,s} = 1$  表示认知 Femtocell 基站  $i^{th}$  ( $i = 1, 2, \dots, F$ ) 中的认知 FU $v$  ( $v = 1, 2, \dots, H$ ) 占用子

信道  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, N$ ), 未占用则  $\varepsilon_{i,v,s} = 0$ 。认知 Femtocell 基站  $j$  到认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的信道功率增益为  $g_{i,j,v,s}^{FF}$ ; 主 Macrocell 到认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的信道功率增益为  $g_{i,v,s}^{MF}$ 。认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的信号与干扰功率比 SINR (signal to interference plus noise ratio) 可以写成

$$\varphi_{i,v,s}^F = \frac{p_{i,v,s}^F g_{i,j,v,s}^{FF}}{p_{m,s}^M g_{i,v,s}^{MF} + \sigma^2} \quad (1)$$

其中,  $p_{i,v,s}^F$  表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的发射功率,  $p_{m,s}^M$  为宏用户  $m$  在子信道  $s$  中的发射功率,  $m$  指正在使用子信道  $s$  的宏用户。  $\sigma^2$  表示加性高斯白噪声功率。在式 (1) 中,  $p_{m,s}^M g_{i,v,s}^{MF}$  表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中受到的来自主 Macrocell 的跨层干扰。Femtocell 基站低功耗、低穿透损耗的特点使认知 Femtocell 相邻基站间的同层干扰可以视作热噪声的一部分,尤其是在郊区稀疏部署的 Femtocell 基站,所以与跨层干扰相比,同层干扰可以忽略不计。文中只考虑跨层干扰。根据香农定理,认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的容量为

$$C_{i,v,s}^F = \varepsilon_{i,v,s} \Delta f \log_2(1 + \varphi_{i,v,s}^F) = \varepsilon_{i,v,s} R_{i,v,s} \quad (2)$$

其中,  $R_{i,v,s} = \Delta f \log_2(1 + \varphi_{i,v,s}^F)$  表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  上最大传输速率。

## 2 基于不完美频谱感知的联合子信道与功率分配算法

### 2.1 Macrocell-Femtocell 同频异构网络干扰分析

认知无线电技术中的频谱感知技术已得到广泛研究<sup>[8-9]</sup>。文中采用合作式频谱感知策略,即每一个认知 FU 感知主 Macrocell 子信道的使用情况,并把感知数据发送给认知 Femtocell 基站,最后由认知家庭接入点 FBS 最优决策,确定每一条子信道是否空闲<sup>[9]</sup>。

认知 Femtocell 对主 Macrocell 的跨层干扰的产生原因主要有两个:其中一个为频谱感知中的漏警和虚警现象造成的,另一个是因为 OFDM 信号的带外发射。

在由认知 Femtocell 和主 Macrocell 构成的同频异构蜂窝网络中,不完美频谱感知会给主 Macrocell 基站造成严重的共信道干扰,影响两层 Femtocell 网络的性能。判断子信道是否被 MU 所占用是由认知 Femtocell 接入点 FBS 确定的,其判断结果分为以下 4 种情况: (1) 主 Macrocell 网络中子信道  $s$  被占用,认知 FBS 判

定子信道  $s$  空闲;(2)主 Macrocell 网络中子信道  $s$  被占用,认知 FBS 判定子信道  $s$  被占用;(3)主 Macrocell 网络中子信道  $s$  空闲,认知 FBS 判定子信道  $s$  空闲;(4)主 Macrocell 网络中子信道  $s$  空闲,认知 FBS 判定子信道  $s$  被占用。情况 1 和情况 4 属于认知 FBS 感知错误情况,情况 2 与情况 3 认知 FBS 做出的决策是正确的。在不完美频谱感知中,情况 1 中子信道  $s$  被占用却被决策为空闲,属于漏警现象,而情况 4 中子信道  $s$  空闲却被决策为繁忙状态,属于虚警现象。假设频谱感知中漏警概率为  $p_m$ ,虚警概率为  $p_a$ ,主 Macrocell 占用子信道  $s$  的概率为  $p_s$ 。令  $H_1$  表示子信道  $s$  被 MU 占用事件, $\tilde{H}_1$  表示认知 FBS 判定子信道  $s$  被占用事件;令  $H_0$  表示子信道  $s$  在 Macrocell 网络中空闲事件, $\tilde{H}_0$  表示认知 FBS 判定子信道  $s$  空闲事件。根据以上假设,可以分别计算出这 4 种情况发生的概率。

子信道  $s$  中出现情况 1 的概率为

$$\begin{aligned} p_{1,s} &= \Pr\{H_1 | \tilde{H}_0\} \\ &= \frac{\Pr\{\tilde{H}_0 | H_1\} \Pr\{H_1\}}{\Pr\{\tilde{H}_0 | H_1\} \Pr\{H_1\} + \Pr\{\tilde{H}_0 | H_0\} \Pr\{H_0\}} \\ &= \frac{p_m p_s}{p_m p_s + (1 - p_a)(1 - p_s)} \end{aligned} \quad (3)$$

子信道  $s$  中出现情况 2 的概率为

$$\begin{aligned} p_{2,s} &= \Pr\{H_1 | \tilde{H}_1\} \\ &= \frac{\Pr\{\tilde{H}_1 | H_1\} \Pr\{H_1\}}{\Pr\{\tilde{H}_1 | H_1\} \Pr\{H_1\} + \Pr\{\tilde{H}_1 | H_0\} \Pr\{H_0\}} \\ &= \frac{(1 - p_m)p_s}{(1 - p_m)p_s + (1 - p_s)p_a} \end{aligned} \quad (4)$$

子信道  $s$  中出现情况 3 的概率为

$$\begin{aligned} p_{3,s} &= \Pr\{H_0 | \tilde{H}_0\} \\ &= \frac{\Pr\{\tilde{H}_0 | H_0\} \Pr\{H_0\}}{\Pr\{\tilde{H}_0 | H_0\} \Pr\{H_0\} + \Pr\{\tilde{H}_0 | H_1\} \Pr\{H_1\}} \\ &= \frac{(1 - p_a)(1 - p_s)}{(1 - p_a)(1 - p_s) + p_m p_s} \end{aligned} \quad (5)$$

子信道  $s$  中出现情况 4 的概率为

$$\begin{aligned} p_{4,s} &= \Pr\{H_0 | \tilde{H}_1\} \\ &= \frac{\Pr\{\tilde{H}_1 | H_0\} \Pr\{H_0\}}{\Pr\{\tilde{H}_1 | H_0\} \Pr\{H_0\} + \Pr\{\tilde{H}_1 | H_1\} \Pr\{H_1\}} \\ &= \frac{(1 - p_s)p_a}{(1 - p_s)p_a + (1 - p_m)p_s} \end{aligned} \quad (6)$$

带外发射是由 OFDM 符号的旁瓣功率泄漏所造成的<sup>[10]</sup>。认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信

道  $s$  中的功率谱密度可以写成:

$$\theta(f) = \varepsilon_{i,v,s} \frac{1}{T_s} \left( \frac{\sin(\frac{\pi f T_s}{2})}{\pi f T_s} \right)^2 \quad (7)$$

其中,  $T_s$  是 OFDM 符号周期。则子信道  $s$  对 Macrocell 已占用子信道  $n$  因为带外发射造成的干扰可表示为

$$I_{i,v,s}^n = \int_{d_{s,n} - \frac{\Delta f}{2}}^{d_{s,n} + \frac{\Delta f}{2}} \theta(f) g_{i,v,s,n}^{FM} df \quad (8)$$

其中  $d_{s,n}$  是认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  与宏用户已占用的子信道  $n$  之间的频谱距离; $g_{i,v,s,n}^{FM}$  表示认知 FU 到主 Macrocell 在子信道  $n$  中的信道功率增益。

基于以上分析,上行链路中认知 Femtocell 系统因为不完美频谱感知造成的共信道干扰以及带外发射对主 Macrocell 造成的跨层干扰  $I_{i,v,s}^{FM}$  可以表示为

$$I_{i,v,s}^{FM} = p_{i,v,s} \left( \sum_{n \in N_0} p_{1,s} I_{i,v,s}^n + \sum_{n \in N_1} p_{2,s} I_{i,v,s}^n \right) = p_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \quad (9)$$

其中  $\tilde{G}_{i,v,s}^{FM} = \sum_{n \in N_0} p_{1,s} I_{i,v,s}^n + \sum_{n \in N_1} p_{2,s} I_{i,v,s}^n$  表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中的信道链路增益,  $N_0$  和  $N_1$  分别表示认知 FBS 判定的空闲子信道集与非空闲子信道集。

## 2.2 资源分配问题数学模型建立

文中资源分配的目标是在满足认知 FU 的 QoS 需求,保证 MU 的通信质量的前提下,联合子信道与功率分配,最大化认知 FU 的总容量,即

$$\begin{aligned} \max_{\{\varepsilon_{i,v,s}, p_{i,v,s}\}} & \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \sum_{s=1}^N C_{i,v,s}^F \\ &= \max_{\{\varepsilon_{i,v,s}, p_{i,v,s}\}} \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} R_{i,v,s} \\ \text{s. t. } & C1: \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} R_{i,v,s} \geq r_{i,v}, \forall i, v \\ & C2: \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} p_{i,v,s} \leq p_{\max}, \forall i, v \\ & C3: p_{i,v,s} \geq 0, \forall i, v, s \\ & C4: \varepsilon_{i,v,s} \in \{0, 1\}, \forall i, v, s \\ & C5: \sum_{v=1}^H \varepsilon_{i,v,s} \leq 1, \forall i, s \\ & C6: \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H p_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \leq I_{th,s}^{FM}, \forall s \end{aligned} \quad (10)$$

其中约束条件 C1 的作用是保证认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  的 QoS 需求,即满足最小传输速率  $r_{i,v}$ ; C2 的作用是限制每一个 FU 的发射功率不高于  $p_{\max}$ ; 约束条件 C4 和 C5 的作用是保证每一个子信道最多被认知 Femtocell 网络中的一个认知 FU 占用;约束条件 C6 给出主 Macrocell 网络中每个子信道跨层干扰温

度限制  $I_{th,s}^{FM}$ , 保护 MU 的通信质量。

### 2.3 资源分配问题凸优化

优化问题(10)是非凸混合整数规划问题, 很难解决且有很高的计算复杂度, 因为该优化问题含有一个连续变量  $p_{i,v,s}$  和一个二元变量  $\varepsilon_{i,v,s}$ 。为降低问题解复杂度, 求解优化问题(10), 松弛约束条件 C4 中的子信道分配系数限制条件到一个连续变量, 即  $\varepsilon_{i,v,s}$  放宽在  $[0, 1]$  区间取值, 此时  $\varepsilon_{i,v,s}$  含义是认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在一个传输帧期间只有部分帧时隙可以占用子信道  $s$ 。记  $\hat{p}_{i,v,s} = \varepsilon_{i,v,s} p_{i,v,s}$ , 表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中动态功率分配,  $I_{i,v,s} = p_{m,s}^M \varepsilon_{i,v,s}^{MF} + \delta^2$ , 表示认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中可以受到的最大干扰, 即干扰上界, 则  $\hat{R}_{i,v,s} = \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{p}_{i,v,s} g_{i,i,v,s}^{FF}}{\varepsilon_{i,v,s} I_{i,v,s}} \right)$  是认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中最大传输速率的下界。基于以上分析, 优化问题(10)可以转化为凸优化问题(11)。

$$\begin{aligned} \max_{\{\varepsilon_{i,v,s}, p_{i,v,s}\}} & \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} \\ \text{s. t. } C1: & \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} \geq r_{i,v}, \forall i, v \\ C2: & \sum_{s=1}^N \hat{p}_{i,v,s} \leq p_{\max}, \forall i, v \\ C3: & \hat{p}_{i,v,s} \geq 0, \forall i, v, s \\ C4: & 0 \leq \varepsilon_{i,v,s} \leq 1, \forall i, v, s \\ C5: & \sum_{v=1}^H \varepsilon_{i,v,s} \leq 1, \forall i, s \\ C6: & \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \hat{p}_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \leq I_{th,s}^{FM}, \forall s \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.4 拉格朗日对偶分解法求解资源分配问题

联合子信道和功率资源分配的优化问题(11)可以使用拉格朗日对偶分解法解答, 该方法已被广泛应用于资源分配问题中。问题(11)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \\ = \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} + \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \alpha_{i,v} \left( \sum_{s=1}^N \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} - r_{i,v} \right) + \\ \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \beta_{i,v} \left( p_{\max} - \sum_{s=1}^N \hat{p}_{i,v,s} \right) + \sum_{i=1}^F \sum_{s=1}^N \gamma_{i,s} \left( 1 - \sum_{v=1}^H \varepsilon_{i,v,s} \right) + \\ \sum_{s=1}^N \delta_s \left( I_{th,s}^{FM} - \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \hat{p}_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \right) \end{aligned}$$

其中  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  分别是约束条件 C1, C2, C5 和 C6 的拉

格朗日乘子。边界约束条件 C3 和 C4 包含在 KKT(karush-kuhn-tucker) 条件中<sup>[11]</sup>。拉格朗日对偶函数为

$$g(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = \max_{\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}} L(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (13)$$

则对偶问题可表示为

$$\min_{\alpha, \beta, \gamma, \delta \geq 0} g(\alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (14)$$

在基于 OFDMA 的认知 Femtocell 系统中, 每一个子信道只能被一个认知 FU 占用, 所以每一个认知 FU 占用的子信道集相互独立。因此可以使用分解法解决该拉格朗日对偶问题。该拉格朗日对偶问题可以分解成一个主对偶问题和  $F \times N$  个独立的子问题, 主对偶问题和子问题都可以使用迭代法解决。拉格朗日函数分解为

$$\begin{aligned} L(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \\ = \sum_{i=1}^F \sum_{s=1}^N L_1(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) - \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \alpha_{i,v} r_{i,v} + \\ \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \beta_{i,v} p_{\max} + \sum_{i=1}^F \sum_{s=1}^N \gamma_{i,s} + \sum_{s=1}^N \delta_s I_{th,s}^{FM} \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} L_1(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \\ = \sum_{v=1}^H \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} + \sum_{v=1}^H \alpha_{i,v} \varepsilon_{i,v,s} \hat{R}_{i,v,s} + \sum_{v=1}^H \beta_{i,v} \hat{p}_{i,v,s} - \\ \sum_{v=1}^H \gamma_{i,s} \varepsilon_{i,v,s} - \sum_{v=1}^H \delta_s \hat{p}_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \end{aligned} \quad (16)$$

假设  $p_{i,v,s}^*$  和  $\varepsilon_{i,v,s}^*$  表示资源配问题(11)功率和子信道分配的最优解。  $L_1(\{\varepsilon_{i,v,s}\}, \{\hat{p}_{i,v,s}\}, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$  分别对  $p_{i,v,s}^*$  和  $\varepsilon_{i,v,s}^*$  求偏导, 运用 KKT 条件如式(17)和(20)所示:

$$\frac{\partial L_1(\dots)}{\partial \hat{p}_{i,v,s}} = \Lambda_{i,v,s} - \beta_{i,v} = 0 \quad (17)$$

其中:

$$\Lambda_{i,v,s} = \frac{(1 + \alpha_{i,v}) \varepsilon_{i,v,s} g_{i,i,v,s}^{FF}}{\ln 2 (\varepsilon_{i,v,s} I_{i,v,s} + \hat{p}_{i,v,s} g_{i,i,v,s}^{FF})} - \delta_s \tilde{G}_{i,v,s}^{FM} \quad (18)$$

根据式(17)和(18), 可以得到认知 Femtocell 基站  $i$  中的认知 FU $v$  在子信道  $s$  中最优发射功率为

$$p_{i,v,s}^* = \frac{\hat{p}_{i,v,s}}{\varepsilon_{i,v,s}} = \left( \frac{(1 + \alpha_{i,v})}{\ln 2 (\beta_{i,v} + \delta_s \tilde{G}_{i,v,s}^{FM})} - \frac{I_{i,v,s}}{g_{i,i,v,s}^{FF}} \right)^+, \forall i, v \quad (19)$$

其中  $(x)^+ = \max(0, x)$ 。

$$\frac{\partial L_1(\dots)}{\partial \varepsilon_{i,v,s}} = \Delta_{i,v,s} - \gamma_{i,s} = 0 \quad (20)$$

其中

$$\Delta_{i,v,s} = (1 + \alpha_{i,v}) \cdot$$



$$\left[ \log_2 \left( 1 + \frac{p_{i,v,s}^* g_{i,j,v,s}^{FF}}{I_{i,v,s}} \right) - \frac{1}{\ln 2} \left( \frac{p_{i,v,s}^* g_{i,j,v,s}^{FF}}{p_{i,v,s}^* g_{i,i,v,s}^{FF} + I_{i,v,s}} \right) \right] \quad (21)$$

根据式(20)和式(21),可知每一个子信道都不能被多个认知 FU 同时使用,而且只有取得  $\Delta_{i,v,s}$  最大值的认知 FU 才可以使用子信道  $s$ ,即

$$\varepsilon_{i,v^*,s} = 1 \mid_{v^* = \max \Delta_{i,v,s}}, \forall i, s \quad (22)$$

以上是  $F \times N$  个子问题的解决过程。式(15)中的主对偶问题是可微的,可以通过迭代更新的次梯度方法解决。基于次梯度方法,主对偶问题求解如下

$$\alpha_{i,v}^{l+1} = [\alpha_{i,v}^{(1)} - \vartheta_1^{(l)} (\sum_{s=1}^N \hat{R}_{i,v,s} - r_{i,v})]^+, \forall i, v \quad (23)$$

$$\beta_{i,v}^{l+1} = [\beta_{i,v}^{(1)} - \vartheta_2^{(l)} (p_{\max} - \sum_{s=1}^N \hat{p}_{i,v,s})]^+, \forall i, v \quad (24)$$

$$\delta_s^{l+1} = [\delta_s^{(1)} - \vartheta_3^{(l)} (I_{th,s}^{FM} - \sum_{i=1}^F \sum_{v=1}^H \hat{p}_{i,v,s} \tilde{G}_{i,v,s}^{FM})]^+, \forall s \quad (25)$$

其中,  $\vartheta_1^{(l)}$ ,  $\vartheta_2^{(l)}$  和  $\vartheta_3^{(l)}$  是变量  $v$  的迭代步长,  $l \in \{1, 2, \dots, l_{\max}\}$ ,  $l_{\max}$  是最大迭代次数。其中迭代步长要满足  $\sum_{l=1}^{\infty} \vartheta_t^{(l)} = \infty$ ,  $\lim_{l \rightarrow \infty} \vartheta_t^{(l)} = 0$ ,  $\forall t \in 1, 2, 3$ 。根据文献[11]可知,该算法可以收敛到最优结果。

### 3 算法性能分析

为验证文中所提出的异构蜂窝网络部署认知 Femtocell 基站场景下,基于不完美频谱感知的联合子信道与功率资源分配优化算法的正确性和有效性,采用 MATLAB 系统级仿真来进行验证,对上述理论进行数值仿真,其中仿真结果并对仿真结果进行分析和总结。使用静态仿真,用户在一次撒点后位置就不再移动。仿真场景是下层部署一个主 Macrocell 基站,上层部署多个认知 Femtocell 基站的两层 Femtocell 网络场景。在系统中部署一个主宏小区,其覆盖半径为 500 m。主 Macrocell 基站位于宏小区的中心,  $M$  个 MU 和  $F$  个认知 Femtocell 基站随机分布在主 Macrocell 覆盖区域。认知 Femtocell 基站半径为 10 m。认知 FU 采用 Overlay 频谱接入模式。认知 Femtocell 基站接入模式为封闭接入。系统的载波频率为 2 GHz,总带宽为  $B = 10$  MHz,  $N_o = -174$  dB/Hz,子信道数  $N_{total} = 50$ ,宏用户数  $M = 20$ ,认知 Femtocell 基站数  $F = 10$ ,每个认知 Femtocell 基站中有  $H = 4$  个认知家庭用户。频谱感知的虚警概率  $p_a$ ,漏警概率  $p_m$  和 MU 占用子信道  $s$  的概率  $p_s$  分别是  $[0.05, 0.1]$ ,  $[0.01, 0.05]$  和  $[0, 1]$

区间的均匀分布。其他参数  $p_{\max} = 23$  dBm,  $r_{i,v} = 9$  bps/Hz,  $I_{th,s}^{FM} = -110$  dBm。

图 2 给出每一个认知 Femtocell 基站用户总容量与迭代次数之间的关系。由图可知提出的算法迭代 5 次便收敛,表明提出的算法可以很快产生最优解、获得很好的系统性能,而且时间复杂度和空间复杂度较低。

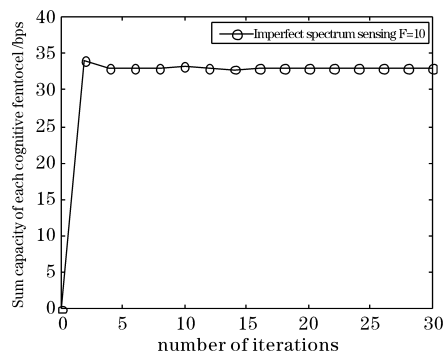


图 2 认知系统性能与迭代次数的关系

表 1 给出每条子信道中 MU 受到的平均跨层干扰与认知 FU 的最大传输功率之间的关系。可以看出提出的基于不完美频谱感知的算法,每条子信道中 MU 受到的平均跨层干扰随认知 FU 的最大传输功率增大而增大,但 MU 受到的跨层干扰不会超过跨层干扰温度限制  $I_{th,s}^{FM}$ 。而基于完美频谱感知的算法中宏用户受到的平均跨层干扰比文中提出的算法的高。这是因为不完美频谱感知中的虚警和漏警现象抑制了一定跨层干扰。

表 1 不完美频谱感知与完美频谱感知抑制干扰性能比较/dBm

FU 最大传输功率	文中算法	完美感知算法
20	-116.01	-114.01
22	-114.52	-111.83
24	-113.31	-110.14
26	-111.15	-108.05
28	-110.00	-106.42
30	-110.00	-105.71

表 2 所示为认知 Femtocell 网络可以获得的系统总容量(bps/Hz)与 FU 最大传输功率之间的关系,可以看出认知 Femtocell 系统总容量随 FU 的最大传输功率的增大而增大。其中对比系统考虑认知 Femtocell 间的同层干扰与没有考虑同层干扰对系统性能的影响,从仿真结果可以看出有无考虑同层干扰对系统性能基本没有影响,即与跨层干扰相比,Femtocell 基站间的干扰很小,基本可以忽略。

表2 有无同层干扰算法系统容量比较

FU 最大传输速率/dBm	文中算法/ bps/Hz	考虑同层干扰算法/ bps/Hz
20	320.11	320.04
22	332.36	332.20
24	340.21	340.02
26	346.54	346.42
28	350.62	350.51
30	351.83	-351.75

表3 比较认知 Femtocell 网络可以获得的系统容量与传统 Femtocell 网络可以获得的系统容量,可以看出,认知性 Femtocell 系统可以获得更高的系统容量,认知 Femtocell 在提高家庭基站系统容量方面优于传统型 Femtocell,并且性能超过约 15%。其中传统 Femtocell 网络系统中资源分配算法是参考文献[12]中的基于频谱感知的联合子信道与功率分配算法。

表3 认知 Femtocell 与传统 Femtocell 系统容量性能比较

FU 最小传输速率需求/bit/s	文中算法/ bps/Hz	文献[12]算法/ bps/Hz
2	340.11	320.14
3	339.56	319.12
4	337.12	317.05
5	337.56	316.62
6	336.21	314.41
7	336.15	311.57
8	335.02	307.01
9	333.24	302.08
10	330.12	297.23

4 结束语

提出一种新的认知 Femtocell 基站系统中基于不完美频谱感知的联合子信道和功率资源分配算法。该算法满足认知 FU 的 QoS 需求,保护 MU 的通信质量,最大化认知 Femtocell 系统总容量。仿真证明本文提出的算法相比于基于完美频谱感知的算法,可以更好地抑制跨层干扰;而且认知型 Femtocell 在提高家庭基站系统容量方面高于传统型 Femtocell,性能平均超过约 15%。

参考文献:

[1] Femto Forum. Regulatory Aspects of Femtocells [S]. May,2008.

[2] H Zhang, X Chu, W Ma, et al. Resource Allocation

with Interference Mitigation in OFDMA Femtocells for Co-channel Deployment [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012:289.

[3] J Zhang, Z Zhang, K Wu, et al. Optimal distributed subchannel, rate and power allocation algorithm in ofdm-based two-tier femtocell networks [J]. in Proc. Veh. Technol. Conf. ,2010:1-5.

[4] Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, (1): 59-67.

[5] V Chandrasekhar, J G Andrews, T Muharemovic, et al. Power control in two-tier femtocell networks [J]. IEEE Wireless Comm. ,2009, 8(8):4316-4328.

[6] L Huang, G Zhu, X Du. Cognitive femtocell networks: an opportunistic spectrum access for future indoor wireless coverage [J]. IEEE Wireless Comm. , 2013, 20(2):44-51.

[7] C Jiang, Y Chen, K J Ray Liu, et al. Renewal-Theoretical Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Network with Unknown Primary Behavior[J]. IEEE J. Sel. Areas in Commun. , 2013, 31(3):406-416.

[8] S M Almalfouh, G L Stuber. Interference-Aware Radio Resource Allocation in OFDMA-Based Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. ,2011, 60(4):1699-1713.

[9] R Xie, F R Yu, H Ji. Dynamic Resource Allocation for Heterogeneous Services in Cognitive Radio Networks With Imperfect Channel Sensing [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. ,2012, 61(2):770 - 780.

[10] H-S Jo, C Mun, J Moon, et al. Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun. , 2009, 8(10):4906-4910.

[11] S Boyd, L Vandenberghe. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004.

[12] H Zhang, C Jiang, N Beaulieu, et al. Joint Sub-channel and Power Allocation in Interference-Limited OFDMA Femtocells with Heterogeneous QoS Guarantee [J]. IEEE Trans. Commun. , 2012, 62(7).

# Resource Allocation in Cognitive Femtocells with Imperfect Spectrum Sensing

SUN Yan<sup>1</sup>, PENG Dai-yuan<sup>1</sup>, LIANG Hong-bing<sup>2</sup>

(1. Southwest JiaoTong University School of Information Science and Technology, Chengdu 611756, China; 2. Southwest JiaoTong University School of Transportation and Logistics, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In this paper, we combine femtocell and cognitive radio technology together effectively and propose a novel network resource allocation scheme for cognitive femtocell based on imperfect spectrum sensing method. This proposed joint sub-channel and power allocation algorithm can suppress the co-channel interference in heterogeneous networks. The target of this proposed resource allocation algorithm is to maximize the sum of the throughput of all femtocell users under the Quality of Service constraints of both femtocell users and macro communication combining the channel and power allocation method. Simulation proved that the all femtocells capacity of cognitive femtocell networks is more about 15% than that of the traditional femtocell networks; Meanwhile, the performance of the cross layer interference suppression and the spectrum utilization of the proposed algorithm is superior to that of the algorithm based on perfect spectrum sensing method, the average cross layer interference of user of macro will not be higher than the cross layer interference limit.

**Key words:** Femtocell; cognitive radio; spectrum sensing; resource allocation