

家庭基站系统中的联合信道与功率控制算法

穆施瑶¹, 朱琦²

(1. 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;

2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 提出了一种联合信道分配与功率控制算法, 通过优化目标将家庭网络的信道分配和功率控制结合, 限定干扰范围, 采用凸优化和次梯度方法, 求解出功率的闭合式, 优化了家庭网络的容量。算法又将家庭网络容量与宏网络容量联系, 使宏网络容量得到了提升。仿真结果表明, 与单纯的功率控制算法相比, 所提算法提高了系统容量。

关键词: 双层网络; 家庭基站; 信道分配; 功率控制; 凸优化

中图分类号: TN929.531

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)04-0141-07

Joint channel allocation and power control in femtocell system

MU Shi-yao¹, ZHU Qi²

(1. Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Educations,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A joint channel allocation and power control algorithm was proposed, which used convex optimization method to combine channel allocation and power control and limit the range of interference, subgradient method was used to solve the close formula of power and optimize the capacity of fem network. In addition, the algorithm had connected the optimal of fem network and macro network together, thus macro network's throughput could be maximized. Simulation results prove that system throughput has been greatly improved.

Key words: two-tier network; femtocell; channel allocation; power control; convex optimization

1 引言

作为提高移动用户室内通话速率的一项新技术, 家庭基站系统正越来越受到人们的关注。从用户的角度, 提高了室内的服务质量和通话速率。从网络服务提供商的角度, 缓解了宏基站(MBS)的压力, 提高了网络整体的覆盖面积和容量^[1]。

为提高频谱的利用率, 在由家庭基站和宏基站组成的双层网络中, 家庭用户和宏用户可共享频谱。因此, 家庭基站网络与宏基站网络之间的跨层

干扰以及家庭基站网络层内的干扰会极大地限制网络的性能。如何减小此干扰已成为研究热点, 这方面的学术文章也大批涌现。文献[2]基于家庭用户从宏基站收到的信号功率分配家庭基站的发射功率, 文献[3]采用博弈论的方法分配家庭基站的发射功率, 文献[4]通过将宏基站的频谱划分多个子频带, 家庭基站选择不同频带来实现干扰的控制。概括而言, 功率控制和信道分配是减小网络干扰, 提高容量的主要方法。文献[5]将信道选择和功率分配结合, 简化处理了功率与信道的分配方案, 但容量

收稿日期: 2012-12-28; 修回日期: 2013-05-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2013CB329005); 国家自然科学基金资助项目(61171094); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03001-006-02, 2011ZX03005-004-03); 江苏省自然科学基金重点研究专项基金资助项目(BK2011027)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB329005); The National Natural Science Foundation of China(61171094); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011ZX03001-006-02, 2011ZX03005-004-03); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province Key Research Projects(BK2011027)

提高并不明显。如何实现两者的协调统一，从而最高效地减小干扰、提高容量，是本文的研究课题之一。同时还研究了如何协调好宏用户和家庭用户间信道分配的关系。

本文的贡献主要有：①引入了信道选择因子，将家庭用户的信道选择和功率分配结合起来，以容量最大化为目标，得到功率与信道选择因子之间的关系；②家庭用户选用基于最远信道搜索的信道分配方法选择信道，最大程度地减小家庭用户之间的干扰；③中央控制器根据各信道的选用情况，对宏用户分配信道，实现了宏用户容量的最大化。

2 干扰模型

本文考虑一个双层网络，由一个宏基站和 N 个家庭基站组成，宏小区内共有 N_c 个宏用户，每个宏用户占用一个信道，共有 N_c 个信道，家庭小区和宏小区共享信道。假设每个家庭基站有 N_f 个家庭用户，每个家庭用户占用一条信道，本文主要研究上行信道，下文中 i 表示家庭用户， j 表示除本家庭用户之外的其他家庭用户， k 表示宏用户， n 表示信道。

如图 1 所示，宏用户 k 与宏基站之间的信道增益为 h_k^{mm} ，家庭用户 j 与邻家庭基站 i 之间的信道增益为 h_{ji}^{ff} ，家庭用户 i 与本家庭基站 i 之间的信道增益为 h_{ii}^{ff} ，家庭用户 i 与宏基站之间的信道增益为 h_i^{fm} ，家庭用户 i 在信道 n 上的发射功率为 p_{in}^f ，其中， $i=1,2,\dots,N_f \times N$ ， $n=1,2,\dots,N_c$ 。家庭系统引入的信道选择因子为 c_{in}^f ，取值为 0 和 1， c_{in}^f 为 1 表明家庭用户 i 占用了信道 n ， c_{in}^f 为 0 表明家庭用户 i 未占用信道 n 。宏用户 k 在信道 n 上的发射功率为 p_{kn}^m ，引入信道选择因子 c_{kn}^m ， σ_n^2 表示信道 n 上的噪声功率。

$$\text{对于宏用户 } k, \text{ 其信噪比 } \gamma_{kn}^m = \frac{c_{kn}^m \times p_{kn}^m \times h_k^{mm}}{\sum_{i=1}^{N_f \times N} c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_i^{fm} + \sigma_n^2}$$

需满足质量要求，即 $\gamma_{kn}^m \geq \gamma_k^h$ ，故家庭用户的发射功率

$$p_{in}^f \text{ 需满足 } \sum_{i=1}^{N_f \times N} c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_i^{fm} \leq \frac{c_{kn}^m \times p_{kn}^m \times h_k^{mm}}{\gamma_k^h} - \sigma_n^2,$$

$$\text{令 } \frac{c_{kn}^m \times p_{kn}^m \times h_k^{mm}}{\gamma_k^h} - \sigma_n^2 = Q_{kn}, \text{ 则 } \sum_{i=1}^{N_f \times N} c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_i^{fm} \leq$$

$$Q_{kn}, \text{ 又功率有限制: } \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times p_{in}^f \leq p_{\max} \quad (i=1,2,\dots,$$

$N \times N_f)$ 。由于每个家庭用户仅使用一条信道，则

$$\sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f = 1。$$

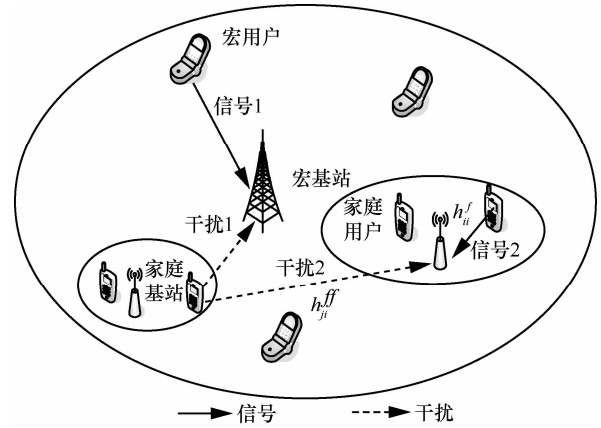


图 1 双层网络的干扰模型

3 联合信道与功率分配算法

3.1 家庭基站系统容量优化模型

此部分主要研究功率和信道的分配以实现上行容量的最大化。家庭用户的上行总容量为

$$\sum_{i=1}^{N \times N_f} \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times \ln(1 + \gamma_{in}^f)。$$

此优化问题可表述为

$$\max \sum_{i=1}^{N \times N_f} \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times \ln\left(1 + \frac{c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} c_{jn}^f \times p_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}\right) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f = 1, \quad i=1,2,\dots,N \times N_f \quad (2)$$

$$c_{in}^f \geq 0, \quad i=1,2,\dots,N \times N_f, n=1,2,\dots,N_c \quad (3)$$

$$c_{in}^f \leq 1, \quad i=1,2,\dots,N \times N_f, n=1,2,\dots,N_c \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N \times N_f} c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_i^{fm} \leq Q_{kn}, \quad n=1,2,\dots,N_c \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times p_{in}^f \leq p_{\max}, \quad i=1,2,\dots,N \times N_f \quad (6)$$

可以看出，上述优化问题属于混合整数规划，属于 NP-hard 问题^[6]。为解决此问题，引入 $\hat{p}_{in}^f = c_{in}^f \times p_{in}^f$ 。上述问题可表述为

$$\max \sum_{i=1}^{N \times N_f} \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}\right) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f = 1, i = 1, 2, \dots, N \times N_f \quad (8)$$

$$c_{in}^f \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \times N_f, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (9)$$

$$c_{in}^f \leq 1, i = 1, 2, \dots, N \times N_f, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{N \times N_f} c_{in}^f \times p_{in}^f \times h_i^{fm} \leq Q_{kn}, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times p_{in}^f \leq p_{\max}, i = 1, 2, \dots, N \times N_f \quad (12)$$

可以看出，上述问题可用凸优化理论求解，改为拉格朗日形式为

$$L = \sum_{i=1}^{N \times N_f} \sum_{n=1}^{N_c} c_{in}^f \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}\right) - \lambda_i \times c_{in}^f + \pi_m \times c_{in}^f - \omega_m \times c_{in}^f + \omega_m - \mu_n \times \hat{p}_{in}^f \times g_i - \nu_i \times \hat{p}_{in}^f + \sum_{i=1}^{N \times N_f} \lambda_i + \sum_{n=1}^{N_c} \mu_n \times Q + \sum_{i=1}^{N \times N_f} \nu_i \times p_{\max} \quad (13)$$

则

$$G = \max \sum_{i=1}^{N \times N_f} \sum_{n=1}^{N_c} G_{in} + \sum_{i=1}^{N \times N_f} \lambda_i + \sum_{n=1}^{N_c} \mu_n \times Q + \sum_{i=1}^{N \times N_f} \nu_i \times p_{\max} \quad (14)$$

其中，

$$G_{in} = \max c_{in}^f \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}\right) - (\mu_n \times g_i + \nu_i) \times \hat{p}_{in}^f - (\lambda_i - \pi_m + \omega_m) \times c_{in}^f + \omega_m \quad (15)$$

求解 G 可转化为求解 $(N \times N_f) \times N_c$ 维的相互独立的 G_{in} ，由 KKT 条件可得

$$\pi_m \times c_{in}^f = 0 \quad (16)$$

$$\omega_m \times (c_{in}^f - 1) = 0 \quad (17)$$

$$\pi_m \geq 0 \quad (18)$$

$$\omega_m \geq 0 \quad (19)$$

同时，对 \hat{p}_{in}^f 求导可得

$$c_{in}^f \times \frac{1}{1 + \frac{\hat{p}_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}} \times \frac{h_{ii}^{ff}}{(\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}) \times c_{in}^f} -$$

$$(\mu_n \times g_i + \nu_i) = 0 \quad (20)$$

对 c_{in}^f 求导可得

$$\ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{in}^f \times h_{ii}^{ff}}{\sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff}}\right) - \lambda_i + \pi_m - \omega_m = 0 \quad (21)$$

则由式(20)可求得

$$p_{in}^f = \left[\frac{1}{\nu_i + \mu_n \times g_i} - \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^{N \times N_f} \hat{p}_{jn}^f \times h_{ji}^{ff} + \sigma_n^2}{h_{ii}^{ff}} \right]^+ \quad (22)$$

$[\cdot]^+$ 定义为 $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$ ，由上式可以看出为使容量最大化， p_{in}^f 与 c_{in}^f 及拉格朗日参数 ν_i 、 μ_n 之间需满足的关系。由于三者相互制约，则下面需要解决的问题是如何一一确定此些变量。

3.2 拉格朗日参数 ν_i 、 μ_n 的确定

本文采用的方法是次梯度方法^[7]，次梯度方法是更新拉格朗日参数的方法之一，相比于椭圆算法，复杂度较低，此处有 2 个拉格朗日因子 ν_i 和 μ_n ，它们都是经过迭代循环实现，其中， ν_i 是针对于每个用户 i 迭代循环，而 μ_n 是针对于每条信道 n 迭代循环，可以得到 ν_i 的更新式如下

$$\nu_i^{l+1} = \left[\nu_i^l - s_i^l \times (p_{\max} - \sum_{n=1}^{N_c} \hat{p}_{in}^f) \right]^+ \quad (23)$$

μ_n 的更新式为

$$\mu_n^{l+1} = \left[\mu_n^l - s_n^l \times (Q_n - \sum_{i=1}^{N \times N_f} \hat{p}_{in}^f \times g_i) \right]^+ \quad (24)$$

此处的 l 为迭代次数， s_i^l 和 s_n^l 为步长，可以证明只要步长选择的足够小， ν_i 和 μ_n 最终必然趋于稳定的最优值^[9]，通常选择步长的准则是 s_i^l 必须能方求和，但不能绝对求和^[10,11]。当梯度有界时，可选用以下确定 s_i^l 和 s_n^l ： $s_i^l = \frac{\beta}{l}$ ， $s_n^l = \frac{\alpha}{l}$ ，选用合适的 α 和 β 可以保证 ν_i 和 μ_n 的收敛性^[6]。

3.3 家庭用户的信道分配

针对信道分配，本文吸取了基于最远信道搜索法的动态信道分配法的思想^[11]，信道分配具体步骤如下。

步骤 1 检查信道集合 $\{1, 2, \dots, N_c\}$ 中是否存在空闲信道，如果存在，则在空闲信道中选取任意一条信道 m 分配给家庭用户，同时结束信道分配过

程；否则执行步骤 2。

步骤 2 对信道集中的每一条信道 m ，遍历使用该信道的所有家庭用户 $\{m_1, m_2, \dots\}$ ，找到其中距离家庭用户 i 最近的家庭用户 m_{\min} ，将 N_c 个信道对应的最近家庭用户组成一个集合 $\{1_{\min}, 2_{\min}, \dots, N_{c \min}\}$ 。

步骤 3 遍历上述集合，找到集合 $\{1_{\min}, 2_{\min}, \dots, N_{c \min}\}$ 中距离家庭用户 i 最远的家庭用户，则该家庭用户使用的信道 m 可分配给家庭用户 i 。

步骤 4 检查家庭用户 i 在信道 m 上能否达到要求的信噪比，若能，则分配信道，结束信道分配；否则拒绝申请。

3.4 确定家庭用户的发射功率

由式(22)可求得家庭用户 i 的发射功率 p_{in}^f 。

3.5 宏用户的信道分配

为进一步提高宏用户的容量，本文给出了宏用户的信道分配方法。

令 $I_{in} = p_{in}^f \times h_i^m$ ， $\hat{I}_{in} = c_{in}^f \times I_{in}$ ， $\hat{p}_{kn}^m = c_{kn}^m \times p_{kn}^m \times h_k^{mm}$ ，优化问题如下

$$\max \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} c_{kn}^m \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{kn}^m}{\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}}\right) \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \sum_{n=1}^{N_c} c_{kn}^m = 1, \quad k = 1, 2, \dots, N_c \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^{N_c} c_{kn}^m = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N_c \quad (27)$$

$$c_{kn}^m \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, N_c, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (28)$$

$$c_{kn}^m \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, N_c, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (29)$$

$$\sum_{n=1}^{N_c} \hat{p}_{kn}^m \leq p_{\max}^m, \quad k = 1, 2, \dots, N_c \quad (30)$$

该问题可以转化为对应的拉格朗日问题^[12]

$$\begin{aligned} L = & \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \left[c_{kn}^m \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{kn}^m}{\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}}\right) - \lambda_k \times c_{kn}^m + \mu_n \times \right. \\ & \left. c_{kn}^m + \pi_{kn} \times c_{kn}^m + \omega_{kn} \times c_{kn}^m + \omega_{kn} - v_k \times \hat{p}_{kn}^m \right] + \\ & \sum_{k=1}^{N_c} \lambda_k + \sum_{n=1}^{N_c} \mu_n + \sum_{k=1}^{N_c} v_k \times \hat{p}_{\max}^m \end{aligned} \quad (31)$$

则

$$G = \max \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} G_{kn} + \sum_{k=1}^{N_c} \lambda_k + \sum_{n=1}^{N_c} \mu_n + \sum_{k=1}^{N_c} v_k \times \hat{p}_{\max}^m \quad (32)$$

其中，

$$\begin{aligned} G_{kn} = & \max c_{kn}^m \times \ln\left(1 + \frac{\hat{p}_{kn}^m}{\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}}\right) - \lambda_k \times c_{kn}^m + \mu_n \times c_{kn}^m + \\ & \pi_{kn} \times c_{kn}^m + \omega_{kn} \times c_{kn}^m + \omega_{kn} - v_k \times \hat{p}_{kn}^m \end{aligned} \quad (33)$$

对 \hat{p}_{kn}^m 求导可得

$$\hat{p}_{kn}^m = \left[\frac{h_k^{mm}}{v_k} - \sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in} \right]^+ \quad (34)$$

由上式可以看出，若使容量最大， $\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}$ 大的

信道对应的 \hat{p}_{kn}^m 较小，对 $\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}$ 和 h_k^{mm} 进行排序，

h_k^{mm} 小的宏用户分配 $\sum_{i=1}^{N_f \times N} \hat{I}_{in}$ 较大的信道。同时，考虑到用户的公平性因素，进一步改进对于距离宏用户距离排序前一半的用户，距离宏基站较远的宏用户分配干扰较大的信道，对于后一半用户，距离宏基站较远的宏用户分配干扰较小的信道，在提高容量的同时保证了条件最差的用户也能得到较好的体验。

本文中对宏用户的资源分配主要是信道分配，若进一步考虑功率的控制，可采用家庭用户容量优化问题中的信道分配和功率控制的处理方法（将多个宏小区之间的干扰考虑在内）。

4 算法步骤

根据第 3 部分的描述，联合信道和功率控制算法共分为 4 个部分，流程如图 2 所示。

算法步骤如下。

步骤 1 令家庭用户序号 $i=1$ (开始信道分配)，检查是否存在空闲信道。

步骤 2 对用户分配信道，即将使用每条信道的用户中距离本用户最近的用户组成集合，找出其中距离本家庭用户最远的用户，本用户使用该用户使用的信道。接着检查家庭用户 i 在信道 m 上能否达到要求的信噪比，并检查所有的家庭用户是否都已分配信道（即 i 是否等于 $N \times N_f$ ）。

步骤 3 令家庭用户序号 $i=1$ (开始功率分配)，信道序号 $n=1$ ，初始化拉格朗日因子 v_i 和 μ_n ，同时初始化各家庭用户的发射功率。

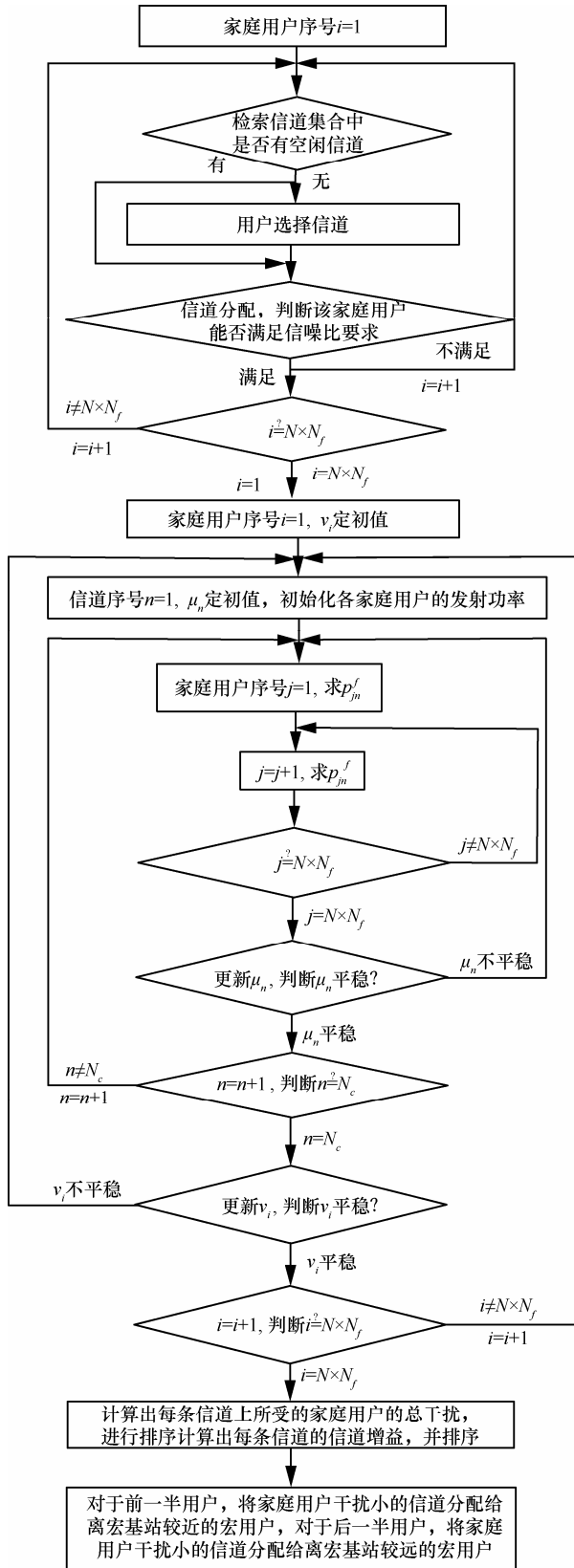


图 2 联合信道和功率控制流程

步骤 4 令家庭用户序号 $j=1$ (为求得平稳的拉格朗日因子 v_i)，求其发射功率 p_{jn}^f ，接着令家庭用

户累加 ($j=j+1$)，求其发射功率。

步骤 5 更新拉格朗日因子 μ_n ，判断 μ_n 是否平稳，接着令信道序号 $n=n+1$ ，判断信道的第一轮循环是否结束。

步骤 6 更新 v_i ，判断 v_i 是否平稳，接着令用户序号 $i=i+1$ ，判断关于 v_i 的循环是否结束。

步骤 7 根据每条信道上家庭用户的总干扰对信道进行排序，再根据宏用户与宏基站之间的信道增益对信道排序，对于前半用户，将家庭用户干扰小的信道分配给离宏基站较近的宏用户，对于后半用户，将家庭用户干扰小的信道分配给离宏基站较远的宏用户，依次进行。

其中步骤 1 和步骤 2 为家庭用户的信道分配过程，步骤 3 至步骤 6 为家庭用户的功率控制过程 (包括次梯度算法确定拉格朗日因子)，步骤 7 为宏用户的信道分配过程。

5 仿真与验证

本文仿真场景的参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

变量	数值
宏小区的个数	1
宏小区的半径/m	100
家庭小区的半径/m	10
家庭用户的最大发射功率/W	0.2
宏用户的发射功率/W	0.5
系统带宽/MHz	10
信道衰落公式 (宏基站与宏用户 家庭基站与本家庭用户) /dB	$30 + 40 \times \lg(d)$ (d 表示两点间的距离)
信道衰落公式 (家庭基站与邻家庭 用户) /dB	$30 + 40 \times \lg(d) + 16$ (d 表示两点间的距离)
信道衰落公式 (宏基站与家庭用户) /dB	$30 + 40 \times \lg(d) + 8$ (d 表示两点间的距离)

本文中的仿真包括 2 部分：第 1 部分是衡量家庭用户网络引入信道因子后系统性能的改变；第 2 部分是衡量宏网络引入信道因子后系统性能的改变，评估系统性能的标准主要是系统容量。仿真中的衰落主要考虑大尺度衰落^[14]。

图 3 给出随着家庭小区个数的增加，家庭用户容量的变化情况。首先可以看出在宏用户信噪比要求相同的情形下，本算法的容量远远大于原算法的容量。由于本文引入了信道选择因子，并基于最远信道搜索方法分配信道，最大程度地减小了同频干

扰。其次，容量的提高量随着小区个数的增加由小变大，最终趋于稳定，因为随着小区个数增加，家庭用户数增加，本文算法的干扰与文献[14]的干扰差会越来越小，故容量的差距也会趋于稳定。

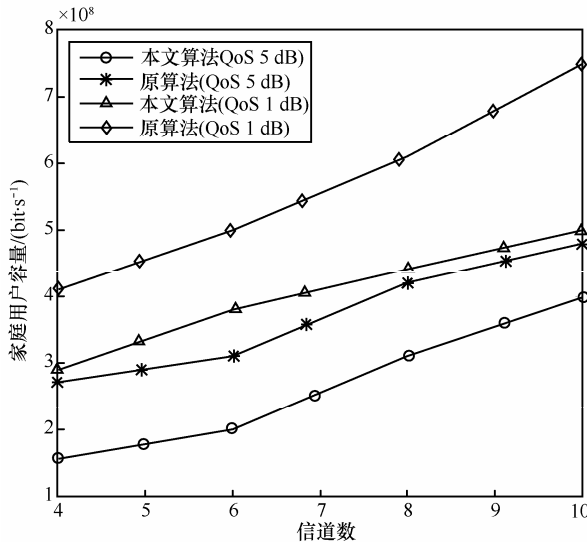


图 3 随着家庭小区个数增加家庭用户容量的变化

图 4 给出随着信道个数的增加，家庭用户容量的变化情况。可以看出在宏用户的信噪比要求相同的情形下，本算法的容量远远大于原算法的容量。

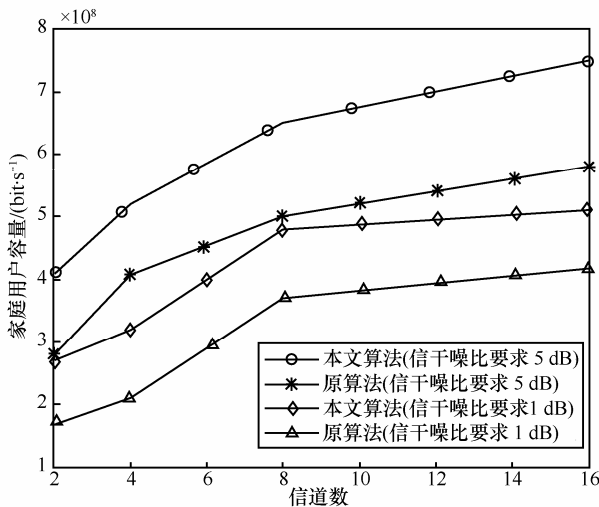


图 4 随着信道个数增加家庭用户容量的变化

图 5 给出随着家庭小区个数增加，宏用户容量的变化情况。首先可以看出在宏用户的信噪比要求相同的情形下，本算法的宏用户容量大于原算法的容量。其次，宏用户的信噪比要求越高，宏用户的容量越大。因为信噪比要求越高，对家庭用户的发射功率限制越大。

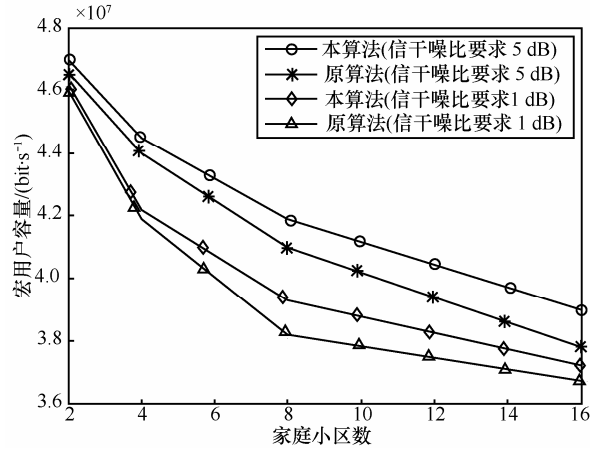


图 5 随着家庭小区个数增加宏用户容量的变化

图 6 给出随着信道个数增加，宏用户容量的变化情况。首先可以看出在宏用户的信噪比要求相同的情形下，本算法的宏用户容量大于原算法的容量。其次，可以看出随着信道的增加，两者容量的差距会越明显，因为随着宏用户个数增加，信道选择带来的影响会变大，容量的差距会越大。再次，宏用户信噪比要求越高，宏用户容量越大。同时在容量提高的基础上，公平性也得到了保证。

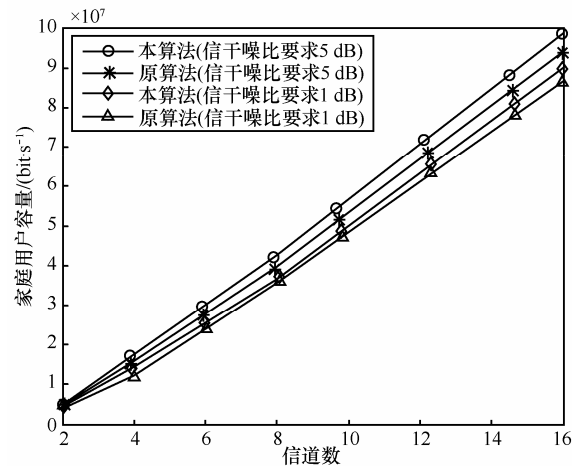


图 6 随着信道个数增加宏用户容量的变化

6 结束语

家庭基站系统中，信道分配和功率控制是 2 种重要的干扰协调方法。本文将两者结合，提出了联合信道分配和功率控制算法，实现了家庭小区内用户信道的分配、功率的控制以及宏用户信道的分配。首先由家庭用户容量最大的优化目标，干扰小于宏用户门限等限制条件建立优化模型，得到家庭用户功率和信道选择因子的关系。接着基于最远信

道搜索的方法对家庭用户分配信道, 同时利用次梯度法循环迭代求解拉格朗日因子, 得到各家庭用户的发射功率。最后基于宏用户位置及信道的性能为宏用户分配信道, 实现宏用户在既定场景下的容量最大化。仿真结果证明家庭用户处联合信道和功率分配算法能实现家庭用户容量的大幅度提高, 宏用户合理选择信道也能实现宏用户容量的提高。

参考文献:

- [1] XIN K, RUI Z. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: a stackelberg game approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(3):538-549.
- [2] CLAYSSSEN H, L H, SAMYEL L. Self-optimization of coverage for femtocell developments[A]. OttawaWTS[C]. 2008. 278-285.
- [3] DUY T N, LONG B L, EKRAM H. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Commun*, 2012, 11(3):979-989.
- [4] JO H S, MUN C, MOON J. Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell network[J]. *IEEE Trans on Wireless Commun*, 2009, 8(10):4906-4910.
- [5] JU Y K, DONG H C. A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in dense femtocell downlink systems[A]. *IEEE 20th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication*[C]. Tokyo, Japan, 2009.
- [6] XIU D, FANG Z, LI Y. Fair channel allocation and power control for uplink and downlink cognitive radio networks[A]. *Global Workshops*[C]. Houston, America, 2011.591-596.
- [7] YU W, LUI R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. *IEEE Transactions on communications*, 2006, 54(7):1310-1322.
- [8] BERTSEKAS D. *Nonlinear Programming*[M]. Belmont, MA: Athena Scientific, 1999.
- [9] SHOR N Z. *Minimization Methods for Non-Differentiable Functions*[M]. New York: Springer, 1985.
- [10] BOYD S. EE392o course notes stanford univ stanford CA[EB/OL]. <http://www.stanford.edu/class/ee392OL.2004>.
- [11] XU X, YE X, ZHOU S, XIAO L. The dynamic channel allocation and using method based on the farthest searching[P]. China, CN1671234, 2005.
- [12] KUANG X, YANG Q, FU F. Resource allocation for femtocell networks with imperfect channel knowledge[A]. *IEEE Conference on Signal Processing Communications and Computing*[C]. Xi'an, China, 2011.
- [13] LI Y. *Cognitive Interference Management in 4G Autonomous Femtocells*[D].Canada: Department of Electrical and Computer Engineering of University of Toronto,2010.
- [14] LI Z, GUO S, LI W, *et al*. A Particle Swam Optimization Algorithm for Resource Allocation in Femtocell Networks[A]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*[C]. Shanghai, China, 2012.

作者简介:



穆施瑶(1989-), 女, 江苏盐城人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为家庭基站系统中的干扰协调等。



朱琦(1965-), 女, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信与无线技术。