

控制与决策

Control and Decision

基于误码率与中断概率约束的femtocell网络分布式功率控制

刘志新, 高露, 袁亚洲

引用本文:

刘志新, 高露, 袁亚洲. 基于误码率与中断概率约束的femtocell网络分布式功率控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 916–922.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1262>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[能量和带宽受限下的分布式一致性融合估计器](#)

Consensus-based distributed fusion estimator with energy and bandwidth constraints

控制与决策. 2020, 35(1): 16–24 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0492>

[考虑执行器性能约束的刚体航天器鲁棒姿态跟踪控制](#)

Robust attitude tracking control of rigid spacecraft considering control input constraints

控制与决策. 2019, 34(4): 735–742 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1384>

[异构通信网联车系统鲁棒协同自适应巡航控制](#)

Robust cooperative adaptive cruise control of connected vehicle systems with heterogonous communication

控制与决策. 2019, 34(11): 2407–2413 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0499>

[有色冶金过程不确定优化方法探讨](#)

Discussion on uncertain optimization methods for nonferrous metallurgical processes

控制与决策. 2018, 33(5): 856–865 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1543>

[舰载机弹药调运不确定系统的T-S模糊优化模型](#)

T-S fuzzy optimization model for uncertain weapons transporting system in carrier aircraft

控制与决策. 2018, 33(4): 639–643 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0271>

[低碳环境下闭环供应链网络设计多目标鲁棒模糊优化问题](#)

Multi-objective robust fuzzy optimization problem for closed-loop supply chain network design under low-carbon environment

控制与决策. 2018, 33(2): 293–300 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1536>

[不确定经济环境下基于EVA的鲁棒供应链网络设计模型](#)

Robust supply chain network design model based on economic value added under economic uncertainty

控制与决策. 2017, 32(2): 203–212 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0012>

[一种基于区间规则的条件证据网络推理决策方法](#)

A conditional evidential network reasoning and decision method based on interval rules

控制与决策. 2016(3): 394–402 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1935>

基于误码率与中断概率约束的 femtocell 网络分布式功率控制

刘志新[†], 高露, 袁亚洲

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 家庭基站 (femtocell) 网络可有效改善无线通信业务的室内覆盖性能, 提高信道容量. 然而, 复杂的动态通信环境导致信道的不确定性, 影响用户服务质量. 基于此, 研究双层 femtocell 网络在快衰落信道环境下基于误码率约束的功率控制问题; 考虑信号传输的中断概率, 以及服务质量指标-误码率等方面的要求, 构造在此约束下的优化问题; 最大化双层 femtocell 网络的净收益, 使得网络系统的通信性能最优; 通过对概率约束进行数学处理, 将其转化为确定性形式, 并提出分布式鲁棒优化算法对等价的不确定性优化问题进行求解, 从而获得最优功率分配策略. 最后, 通过仿真验证了所提出算法的收敛性和有效性.

关键词: 双层 femtocell 网络; 功率分配; 服务质量; 鲁棒优化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Distributed power control based on bit error rate and outage probability constraint in two-tier femtocell networks

LIU Zhi-xin[†], GAO Lu, YUAN Ya-zhou

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Femtocell network is an efficient technique to improve the coverage performance indoor and promote the capacity of wireless communications. However, the uncertainty of channel gain caused by the dynamic communication environment deteriorates the quality of service of users. The power control problem of two-tier femtocell networks is studied based on bit error rate constraint in the fast fading channel environment. Considering the requirements in aspect of outage probability of signal transmission and the quality of service index-bit error rate, the optimization problem under the probability constraint is constructed to maximize the net income of the two-tier femtocell networks, which makes the communication performance of the network system optimal. By processing the probability constraint, it is transformed into a deterministic expression form, and the distributed robust optimization algorithm is proposed to solve the equivalent deterministic optimization problem, so as to obtain the optimal solution of the optimization problem. Finally, the convergence and effectiveness of the proposed distributed optimization algorithm are verified by simulations.

Keywords: two-tier femtocell networks; power allocation; quality-of-service; robust optimization

0 引言

近年来, 由于在增强蜂窝网络覆盖范围以及为室内用户提供可靠通信服务等方面有明显优势, femtocell 网络的研究备受关注. femtocell 作为一种短距离、低功耗、低成本的室内无线数据接入点, 可以由终端用户自行安装, 即插即用, 从而得到更好的室内语音和宽带服务^[1]. 但是, 由于 femtocell 和宏蜂窝共享相同的信道进行信号传输, femtocell 与宏蜂窝之间的干扰, 以及相邻家庭蜂窝之间的干扰成为一个不可忽视的技术挑战. 另外, 移动通信中不仅需要保证话

音质量和数据传输质量的可靠性, 更加全面的服务质量同样需要考虑在内^[2].

一些文献已经提出相关的干扰管理方案. 文献 [3] 提出了一种下行链路干扰估计方案来最大化用户设备的吞吐量; 文献 [4] 研究了上行链路 femtocell 网络中联合子载波和功率的分配问题, 对产生的干扰施加干扰温度限制, 从而抑制跨层干扰. 此外, 功率控制作为干扰管理的一种有效方法, 国内外大量文献已经对其进行了广泛研究. 文献 [5] 提出了一种随机逼近算法来对 femtocell 网络下行链路功率控制问

收稿日期: 2018-09-16; 修回日期: 2018-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61473247, 61873223, 61803328); 河北省自然科学基金项目 (F2017203140).

[†]通讯作者. E-mail: lzxauto@ysu.edu.cn.

题进行研究;文献[6]运用合作最优控制理论研究了 femtocell 网络中进行干扰管理的功率控制问题;文献[7]通过提出两种算法来对家庭基站之间的干扰避免问题进行了研究,目的是尽可能地最大化每个家庭用户的平均可达数据速率.为缓解双层 femtocell 网络中的跨层干扰问题,文献[8]提出了一种分布式功率控制算法;文献[9]用 Stackelberg 博弈建立了频谱共享的 femtocell 网络联合价格和功率分配问题.将宏小区用户干扰容限及其最小速率要求作为效用函数中的约束.文献[10]针对 femtocell 网络中存在的干扰问题,提出了一种基于 Stackelberg 博弈和议价博弈的功率控制策略;文献[11]讨论了 OFDMA 双层 femtocell 网络中的功率优化问题,保证了宏用户和家庭用户的传输速率;文献[12]研究了功率控制在干扰抑制方面的作用,并提出了一种优化 femtocell 性能的链路保护方法;文献[13]通过调整 femtocell 用户的最大传输功率,将干扰限制在一定范围内.然而,这些文献都忽略了 femtocell 网络中用户服务质量-误码率方面的要求,并且没有考虑信道状态信息(CSI)的不确定性.

实际的无线通讯信道环境往往是变化的,无法准确地确定 CSI.在以往的工作中,大量文献考虑了 CSI 的不确定性.文献[14]分析了非理想 CSI 条件下人工噪声对密集异构蜂窝网安全可靠通信的影响,并给出了解决方案;文献[15]研究了在信道增益具有有界误差的情况下认知无线网络中鲁棒能效最大化问题,并采用鲁棒优化方法来确保主用户的服务质量;文献[16]不仅考虑了主用户和次级用户之间的信道中的不确定性,还考虑了主用户信道中的估计误差,提出一种鲁棒功率分配和中继选择方案.考虑不理想的 CSI,所描述的问题可以更加精确.因此,本文同时考虑通信环境的不确定性和用户的服务质量要求,研究双层 femtocell 网络的功率优化问题;分析信道的不确定性和用户的服务质量,在保证中断概率和递包率的同时,最大化双层 femtocell 网络系统的净收益;将概率约束进行确定性的转化,并提出一种分布式鲁棒优化算法对优化问题进行求解,进而获得每个用户的最优传输功率.

1 优化问题描述

1.1 系统模型

本文考虑一个宏基站和 N 个在宏蜂窝内随机部署的 femtocell 基站所组成的两层 femtocell 网络, femtocell 与宏蜂窝共享相同的频谱资源.如图 1 所示,假设一个宏基站为一个宏用户提供服务,并且宏

基站位于区域的中心,覆盖半径为 R_m 米.同样,每个 femtocell 也为其相应的家庭用户提供服务,其覆盖半径为 R_f .考虑上行链路如图 1 所示,图中实线和虚线分别表示从用户到基站的上行链路通信信号和干扰信号. MBS 表示宏基站, FBS 表示家庭基站, MUE 表示宏用户, FUE 表示家庭用户.

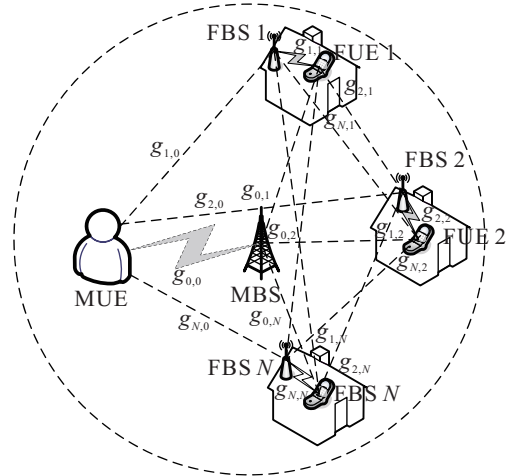


图 1 系统模型

如图 1 所示,对给定时隙内的两层 femtocell 网络上行链路信号传输进行建模.其中 $g_{i,j}$ 表示从用户 j 到基站 i 的上行链路信道增益,且有 $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{I}, \mathcal{I} = \{0, 1, \dots, N\}$. $g_{0,0}$ 表示从宏用户到宏基站的信道增益, $g_{i,j} (i, j \neq 0)$ 表示从家庭用户到家庭基站的信道增益. $\mathcal{P} = \{p_0, p_1, \dots, p_N\}$ 表示所有用户的功率向量,且 $0 \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i$.

本文中,考虑到瑞利衰落的信道环境,将从宏用户到宏基站的通信链路称为室外链路,将从家庭用户到其所对应家庭基站的通信链路称为室内链路,将从家庭用户到其他家庭基站的干扰链路称为室内-室外链路.使用 IMT-2000 规范^[17]中简化的路径损耗模型来对平均信道增益进行如下表示:

$$g_{i,j} = \begin{cases} K_c \min(D_{i,j}^{-\alpha_c}, 1), & i = j = 0; \\ K_{f_i} R_f^{-\beta}, & i = j > 1; \\ K_{f_o} W \min(D_{i,0}^{-\alpha_{f_o}}, 1), & i > 0, j = 0; \\ K_c W \min(D_{i,j}^{-\alpha_c}, 1), & i = 0, j > 0; \\ K_{f_o} W^2 \min(D_{i,j}^{-\alpha_{f_o}}, 1), & i \neq j, i, j > 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: α_c 、 β 、 α_{f_o} 分别表示室外、室内、室内-室外路径损耗指数; f_c 表示载波频率; $K_c = 30 \log_{10}(f_c) - 71$ dB, 表示从宏用户到宏基站的固定分贝传播损耗; K_{f_i} 表示从家庭用户 i 到家庭基站 i 的固定损耗, K_{f_o} 表示家庭用户 j 与其他家庭基站 i 之间的固定损耗,

假设 $K_c = K_{f0}$; W 表示室内-室外传播过程中的分区损耗; $D_{i,j}$ 表示用户 j 到基站 i 的传输距离.

1.2 概率约束下鲁棒优化问题的建立

用户 i 在基站处的瞬时信干噪比如下:

$$\gamma_i = \frac{p_i G g_{i,i}}{\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2}, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \quad (2)$$

其中:在给定的时隙内,假定 $g_{i,i}$ 和 $g_{i,j}$ 是常量; G 是瑞利衰落模型下服从单位平均指数分布的独立同分布的随机变量,其概率密度函数^[18]为 $f_G(x) = e^{-x}$; σ^2 是背景噪声.为了处理不确定性参数 G 和保证无线网络通信质量,引入如下中断概率约束:

$$\Pr[\gamma_i \geq \gamma_i^{\min}] \geq 1 - \epsilon_1, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \quad (3)$$

其中: γ_i 表示用户 i 的瞬时信干噪比; γ_i^{\min} 表示用户 i 的目标信干噪比,为事先给定值; ϵ_1 表示中断概率阈值,且有 $\epsilon_1 \in (0, 1)$.

在信道变化较快的无线环境下,常常采用平均CSI来对信道状态进行描述.因此,给出确定性等效信干噪比的定义,表示如下:

$$\bar{\gamma}_i = \frac{\mathbb{E}[p_i G g_{i,i}]}{\mathbb{E}\left[\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2\right]} = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2}. \quad (4)$$

在无线网络中,信道容量可以由最大传输速率表征.使用香农定理来计算最大信号传输速率,可以得到用户的确定性等效传输速率为

$$\bar{R}_i = Q \log(1 + K \bar{\gamma}_i). \quad (5)$$

其中: Q 表示基带带宽; K 是取决于调制、编码方案和误码率的常量.为表述方便,本文假设 $Q = K = 1$,这并不影响优化问题的求解.因此,蜂窝网络的总数据速率可以表示为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{i=0}^N \bar{R}_i = \sum_{i=0}^N \log(1 + \bar{\gamma}_i). \quad (6)$$

此外,本文还针对误码率作为服务质量的指标进行讨论.误码率可以表示如下:

$$\text{BER} = 1 - \beta_i, \quad (7)$$

其中 β_i 表示用户 i 成功传输数据包的概率(即递包率^[19]).递包率的值取决于 γ_i 和 γ_i^{\min} , 它们的关系式为

$$\beta_i = \exp(-\gamma_i^{\min}/\gamma_i), \quad \forall i \in \mathcal{I}. \quad (8)$$

据此,将递包率约束构造为

$$\Pr[\beta_i \geq \beta_i^{\min}] \geq 1 - \epsilon_2, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \quad (9)$$

其中: β_i^{\min} 表示用户 i 的递包率的下界; ϵ_2 表示中断概率阈值,且有 $\epsilon_2 \in (0, 1)$.

本文将网络系统的总数据速率看作收益.由于用户只能获得本地的CSI,并不知道干扰链路的信道增益,而功率值的大小在一定程度上能够反映其造成干扰的大小,因此对功率进行定价,作为用户要付出的成本.效用函数构造为总传输速率和成本的差值,因此鲁棒优化问题被构建为,在递包率的约束下,最大化整个 femtocell 网络的净收益,表示如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & \omega R_{\text{sum}} - \sum_{i=0}^N c p_i. \\ \text{s.t.} \quad & \Pr[\gamma_i \geq \gamma_i^{\min}] \geq 1 - \epsilon_1, \quad \forall i \in \mathcal{I}; \\ & \Pr[\beta_i \geq \beta_i^{\min}] \geq 1 - \epsilon_2, \quad \forall i \in \mathcal{I}; \\ & 0 \leq p_i \leq p_i^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: ω 表示单位速率获得的收益; c 表示统一价格; p_i^{\max} 表示用户 i 的功率上界,对功率进行约束用以限制对其他基站造成的干扰.

2 基于概率约束的功率分配

2.1 不确定性转化

定理1 对于 $i \in \mathcal{I}, \mathcal{I} = \{0, 1, \dots, N\}$, 用户的中断概率约束 $\Pr[\gamma_i \geq \gamma_i^{\min}] \geq 1 - \epsilon_1$ 等价于

$$\frac{-\gamma_i^{\min}}{\ln(1 - \epsilon_1)} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) - g_{i,i} p_i \leq 0.$$

证明 由 $\gamma_i \geq \gamma_i^{\min}$ 和式(2)可以得到

$$\begin{aligned} \frac{p_i G g_{i,i}}{\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2} & \geq \gamma_i^{\min} \Leftrightarrow \\ G & \geq \frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2 \right)}{p_i g_{i,i}}. \end{aligned} \quad (11)$$

因此,中断概率约束可以重新表述为

$$\begin{aligned} \Pr[\gamma_i \geq \gamma_i^{\min}] & \geq 1 - \epsilon_1 \Leftrightarrow \\ \Pr \left[G \geq \frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2 \right)}{p_i g_{i,i}} \right] & \geq 1 - \epsilon_1. \end{aligned} \quad (12)$$

通过随机变量 G 的概率密度函数 $f_G(x) = e^{-x}$, 对变量积分求解可以得到

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2 \right)}{p_i g_{i,i}}} e^{-x} dx & \leq \epsilon_1 \Leftrightarrow \\ 1 - \exp \left(-\frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2 \right)}{p_i g_{i,i}} \right) & \leq \epsilon_1. \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)进行整理,可以得到

$$\bar{\gamma}_i = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=0, j \neq i}^N p_j g_{i,j} + \sigma^2} \geq \frac{-\gamma_i^{\min}}{\ln(1 - \epsilon_1)}. \quad (14)$$

因此,能得到中断概率约束的确定性等效表达式

$$\frac{-\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right)}{\ln(1 - \epsilon_1)} - g_{i,i} p_i \leq 0. \quad (15)$$

证明完毕. □

与定理1相似,可以得到递包率约束的确定形式表达

$$\frac{\gamma_i^{\min}}{\ln \beta_i^{\min} \ln(1 - \epsilon_2)} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) - g_{i,i} p_i \leq 0.$$

限于篇幅,证明略.

通过对约束条件进行转化,可以得到问题(10)的确定性鲁棒功率分配问题如下所示:

$$\begin{aligned} \max \quad & \omega R_{\text{sum}} - \sum_{i=0}^N c p_i. \\ \text{s.t.} \quad & \frac{-\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right)}{\ln(1 - \epsilon_1)} - g_{i,i} p_i \leq 0, \forall i \in \mathcal{I}; \\ & \frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right)}{\ln \beta_i^{\min} \ln(1 - \epsilon_2)} - g_{i,i} p_i \leq 0, \forall i \in \mathcal{I}; \\ & 0 \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in \mathcal{I}. \end{aligned} \quad (16)$$

进一步,假设 γ_i^{\min} 、 β_i^{\min} 、 ϵ_1 和 ϵ_2 的参数选择能够满足使优化问题(16)存在可行点. 若优化解超出变量可行域,则表明在相应的变量约束和条件约束下最优问题无解,可采用相关的接纳控制算法移除部分用户,此情况本文不作讨论.

定理2 问题(16)是一个凸优化问题.

证明 对问题(16)中的目标函数求解其关于变量 p_i 一阶导函数,可以得到

$$U_i = \omega \sum_{i=0}^N \log(1 + \bar{\gamma}_i) - \sum_{i=0}^N c p_i, \quad (17)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial p_i} = \frac{\omega g_{i,i}}{\left(g_{i,i} p_i + \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) \ln 2} - c. \quad (18)$$

进一步得到其二阶导函数为

$$\frac{\partial^2 U_f}{\partial p_i^2} = \frac{-\omega g_{i,i}^2 \ln 2}{\left(\left(g_{i,i} p_i + \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) \ln 2 \right)^2} < 0. \quad (19)$$

易得其二阶导函数小于0,故问题(16)的目标函数是关于变量 p_i 的凹函数,变量 p_i 所在的集合 $\{p_i : 0 \leq p_i \leq p_i^{\max}\}$ 为非空的紧子集,所以问题(16)是一个标准凸优化问题. □

2.2 功率迭代算法

由于问题(16)是一个凸优化问题,必然存在唯一的可行解,也就是最优解. 因此构造问题(16)的拉格朗日函数,并将其分解为 $N + 1$ 个子问题表示如下:

$$L(\mathbf{p}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{i=0}^N L_i(p_i, \nu_i, \mu_i), \quad (20)$$

其中 ν_i 、 μ_i 分别是干扰概率约束和递包率约束的拉格朗日乘子. 每个子问题的拉格朗日函数表示如下:

$$\begin{aligned} L_i(p_i, \nu_i, \mu_i) = & \omega \log(1 + \bar{\gamma}_i) - c p_i - \nu_i \frac{-\gamma_i^{\min}}{\ln(1 - \epsilon_1)} \times \\ & \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) + \nu_i g_{i,i} p_i - \\ & \mu_i \frac{\gamma_i^{\min}}{\ln \beta_i^{\min} \ln(1 - \epsilon_2)} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) + \mu_i g_{i,i} p_i. \end{aligned} \quad (21)$$

使用次梯度法对问题(21)进行求解,可以得到拉格朗日乘子的迭代更新表达式

$$\nu_i^{(t+1)} = \left[\nu_i^{(t)} + \kappa_{\nu}^{(t)} \left(\frac{-\gamma_i^{\min}}{\ln(1 - \epsilon_1)} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j^{(t)} + \sigma^2 \right) - g_{i,i} p_i^{(t)} \right) \right]^+, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mu_i^{(t+1)} = & \left[\mu_i^{(t)} + \kappa_{\mu}^{(t)} \left(\frac{\gamma_i^{\min}}{\ln \beta_i^{\min} \ln(1 - \epsilon_2)} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j^{(t)} + \sigma^2 \right) - g_{i,i} p_i^{(t)} \right) \right]^+. \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $\kappa_{\nu}^{(t)}$ 、 $\kappa_{\mu}^{(t)}$ 分别是拉格朗日乘子 ν_i 和 μ_i 的正的迭代步长, $[X]^+ = \max\{X, 0\}$. 基于如下库恩-塔克(KKT)条件,可以得到每个用户的最优传输功率

$$\begin{cases} \frac{\partial L_i(p_i, \nu_i, \mu_i)}{\partial p_i} = 0, \\ \nu_i \left(\frac{-\gamma_i^{\min}}{\ln(1 - \epsilon_1)} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right) - g_{i,i} p_i \right) = 0, \\ \mu_i \left(\frac{\gamma_i^{\min} \left(\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j + \sigma^2 \right)}{\ln \beta_i^{\min} \ln(1 - \epsilon_2)} - g_{i,i} p_i \right) = 0, \\ \nu_i, \mu_i \geq 0. \end{cases} \quad (24)$$

求解得到每个用户的最优传输功率为

$$p_i^* = \left[\frac{\omega}{(c - (\nu_i^* + \mu_i^*)g_{i,i}) \ln 2} - \frac{\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j^* + \sigma^2}{g_{i,i}} \right]_0^{p_i^{\max}} \quad (25)$$

其中: ν_i^* 、 μ_i^* 表示拉格朗日乘子的最优值, p_j^* 表示除了用户 i 以外其他用户的最优传输功率.

进一步得到每个用户的功率迭代表达式为

$$p_i^{(t+1)} = \left[\frac{\omega}{(c - (\nu_i^{(t)} + \mu_i^{(t)})g_{i,i}) \ln 2} - \frac{\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} p_j^{(t)} + \sigma^2}{g_{i,i}} \right]_0^{p_i^{\max}} \quad (26)$$

定理3 如果 $\left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} / g_{i,i} \right\|_{\infty} < 1$ 成立, 则功率迭代式(26)将会收敛到最优值.

证明 令 $\Delta p_i(t) = p_i(t) - p_i^*$, 将式(25)和(26)代入其中, 可以得到

$$\begin{aligned} |\Delta p_i(t+1)| &= \\ |p_i(t+1) - p_i^*| &= \\ \left| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} (p_j^{(t)} - p_j^*) / g_{i,i} \right| &\leq \\ \left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} / g_{i,i} \right\|_{\infty} \left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N \Delta p_j(t) \right\|_{\infty} &\quad (27) \end{aligned}$$

在双层 femtocell 网络中, 由于蜂窝内用户与其相应基站之间的距离比较近, 通信链路的信道变化比较大, 可以得到 $\sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} < g_{i,i}$, 所以

$$\left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} / g_{i,i} \right\|_{\infty} < 1.$$

由 l_{∞} -范数的定义可知

$$\left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N \Delta p_j(t) \right\|_{\infty} = \max_{j \in \mathcal{I}, j \neq i} |\Delta p_j(t)|.$$

因此, 由式(27)可得

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N \Delta p_j(t) \right\|_{\infty} &\leq \\ \left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} / g_{i,i} \right\|_{\infty} \cdot \left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N \Delta p_j(t) \right\|_{\infty} &\quad (28) \end{aligned}$$

由此可知, 若

$$\left\| \sum_{j=0, j \neq i}^N g_{i,j} / g_{i,i} \right\|_{\infty} < 1$$

成立, 则式(28)将最终收敛到0. 换言之, 用户的传输

功率 $p_i^{(t+1)}$ 最终会收敛到最优值, 即 $p_i = p_i^*$. \square

给出如下分布式鲁棒优化算法来求解问题(16).

算法1 分布式鲁棒功率控制算法.

step 1: 初始化. 设定迭代步数 t_{\max} 及初始功率 $p_i^{(0)}$, 满足 $0 \leq p_n^{(0)} \leq p_n^{\max}$. 设定拉格朗日乘子初值 $\nu^{(0)} \geq 0, \mu^{(0)} \geq 0$. 设定迭代步长 $\kappa_{\nu}^{(t)} > 0, \kappa_{\mu}^{(t)} > 0$.

step 2: 根据式(1)计算信道增益 $g_{i,i}$ 和 $g_{i,j}$.

step 3: 根据式(26)计算用户功率 $p_i^{(t+1)}$ 和 $p_j^{(t)}$.

step 4: 根据式(22)和(23)对拉格朗日乘子 $\nu_i^{(t+1)}$ 和 $\mu_i^{(t)}$ 进行更新.

step 5: 将更新的拉格朗日乘子 $\nu_i^{(t+1)}$ 和 $\mu_i^{(t)}$ 返回到 step 3.

step 6: 更新 $t = t + 1$.

step 7: $t = t_{\max}$, 或 $\|p_i^{(t+1)} - p_i^{(t)}\|_{\infty} \leq \epsilon$, 结束.

3 仿真实验与性能分析

本节进行仿真测试, 进而评估所提出的鲁棒功率控制方案在双层 femtocell 网络中的性能. 这里, 假设有 1 个宏用户, 10 个家庭用户随机分布在相应的覆盖范围内. 部分仿真参数如表 1 所示.

表 1 系统仿真参数

参数	数值
宏蜂窝半径 R_m/m	300
家庭蜂窝半径 R_f/m	30
最大传输功率 P_{\max}/W	0.5
载波频率 f_c/MHz	2000
目标信干噪比 Y_m/dB	5
室内损耗 K_{fi}	$10^{3.7}$
分区损耗 W	$10^{0.5}$
室外路径损耗指数 α_c, α_{fo}	4
室内路径损耗指数 β	3
平均背景噪声 σ^2	10^{-5}
中断概率阈值 ϵ_1, ϵ_2	0.2
速率系数 ω	1
统一价格 c	10
递包率阈值 B_{th}	0.7

图 2 给出了系统的功率收敛图, 虚线表示宏用户的功率收敛曲线, 实线表示家庭用户的功率收敛曲线. 数值分析中, 设置用户传输功率的迭代步数 $t_{\max} = 20$, 用户的初始功率值设置为 0.5 W. 如图 2 所示, 可以看到宏用户和家庭用户的传输功率都在较短的时间内收敛到最优值. 这表明了本文所提鲁棒功率控制算法的有效性.

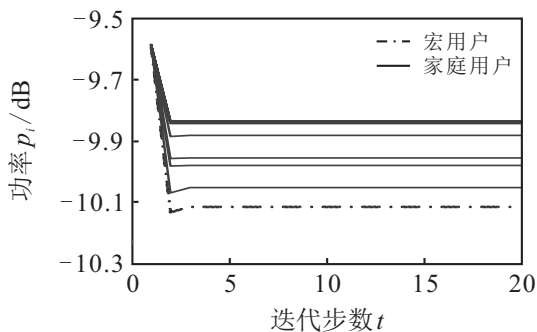


图2 功率收敛图

图3为宏用户和家庭用户的实际中断概率与目标中断阈值关系图,虚线表示宏用户的实际中断概率曲线,实线表示家庭用户的实际中断概率曲线. 这里目标中断阈值 ϵ 分别从0.1取到0.5. 从图3可以看到, 每个用户的实际中断概率都在目标中断阈值之下, 这表明了所提鲁棒功率控制算法可以有效保证网络系统的通信性能.

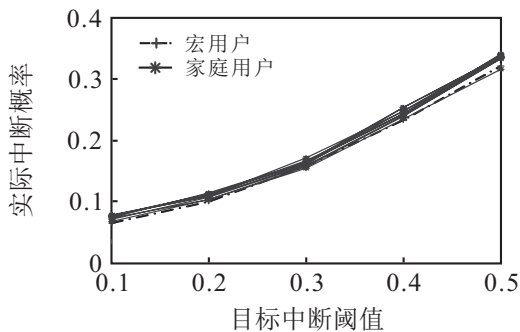


图3 实际中断概率与目标中断阈值关系

图4为不同信噪比阈值下宏用户和家庭用户的效用对比图. 图4中,用户1表示宏用户,用户2~用户11表示家庭用户. 在数值分析中,通过改变信噪比阈值,分别在 $Y_m = 3\text{ dB}$, $Y_m = 5\text{ dB}$ 和 $Y_m = 8\text{ dB}$ 三种情况下求出每个用户的净收益. 从图4可以看到, 随着信噪比阈值的增大,用户效用呈递减的趋势. 信噪比阈值增大表明有用信号的强度增强,但对其他用户造成的干扰也增加,用户需要付出更多成本以保证整个网络系统用户的通信质量,因此效用随之降低.

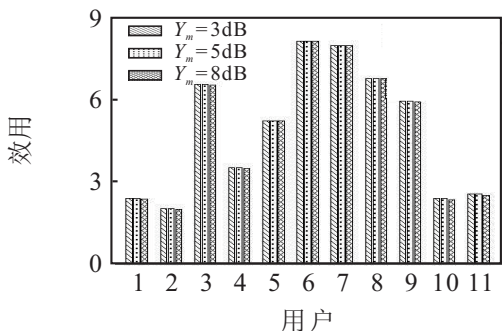


图4 不同信噪比阈值下用户效用对比

进一步将本文算法与文献[9]所提的基于非合作博弈的资源优化分配算法进行对比,结果如图5所示. 由仿真结果可知,本文算法在中断概率保证方面有了较为明显的性能提升. 主要原因在于,将信道的不确定性考虑进来,将其作为优化问题的约束条件. 当网络通信过程中存在此类不确定信息时,系统表现出较好的鲁棒性.

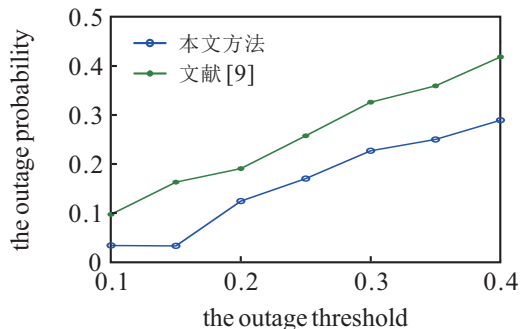


图5 中断概率对比

4 结论

本文考虑了在快衰落信道环境下基于误码率与中断概率约束的双层 femtocell 网络的功率优化问题. 在确保中断概率和递包率要求的同时,最大化双层 femtocell 网络系统的净收益. 通过将概率约束进行转化,得到确定形式的优化问题,并提出一种分布式鲁棒优化算法来获取最优解. 仿真结果表明了所提算法在双层 femtocell 网络系统中的合理性和有效性.

参考文献 (References)

- [1] Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell networks: A survey[J]. Communications Magazine IEEE, 2008, 46(9): 59-67.
- [2] Liu Y, Wu H, Xia Y, et al. Optimal online data dissemination for resource constrained mobile opportunistic networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5301-5315.
- [3] Niu C, Li Y, Hu R Q, et al. Femtocell-enhanced multi-target spectrum allocation strategy in LTE-A HetNets[J]. IET Communications, 2017, 11(6): 887-896.
- [4] Khamidehi B, Sabbaghian M. Resource allocation for SC-FDMA femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4573-4585.
- [5] Wang H, Zhu C, Ding Z. Femtocell power control for interference management based on macrolayer feedback[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5222-5236.
- [6] Sanchez A, Arauz J, McClure J W, et al. Cooperative self-organized optimal power control for interference

- mitigation in femtocell networks[C]. IEEE Colombian Conference on Communications and Computing. Cartagena: IEEE, 2016: 1-6.
- [7] Chen J, Yang C C, Sheu S T. Downlink femtocell interference mitigation and achievable data rate maximization: Using FBS association and transmit power-control schemes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(6): 2807-2818.
- [8] Ngo D T, Le L B, Lengoc T, et al. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 979-989.
- [9] Ahmad I, Liu S, Feng Z, et al. Game theoretic approach for joint resource allocation in spectrum sharing femtocell networks[J]. Journal of Communications & Networks, 2014, 16(6): 627-638.
- [10] 叶成荫, 梁炜, 郑萌. 基于Stackelberg和议价博弈的femtocell网络功率控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1709-1713.
(Ye C Y, Liang W, Zheng M. Power control based on Stackelberg and bargaining game in femtocell network[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1709-1713.)
- [11] 马文敏, 郑伟, 张海君, 等. OFDMA毫微微小区网络中基于效用公平的功率控制策略[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2287-2292.
(Ma W M, Zheng W, Zhang H J, et al. Utility-based fairness power control scheme in OFDMA femtocell networks[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(10): 2287-2292.)
- [12] 周姝姝, 徐扬. Femtocell双层网络中基于博弈论的功率控制研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(11): 168-171.
(Zhou S S, Xu Y. Study on power control in two-tier femtocell networks based on theory game[J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(11): 168-171.)
- [13] Han Q, Ma K, Liu Z, et al. Power control based on maximum power adaptation in two-tier femtocell networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 70(1): 331-351.
- [14] 许耘嘉, 黄开枝, 李军, 等. 非理想信道下基于人工噪声的密集异构蜂窝网安全传输方案[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2323-2330.
(Xu Y J, Huang K Z, Li J, et al. Artificial noise aided secure transmission in dense heterogeneous cellular networks with imperfect channel state information[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018, 40(10): 2323-2330.)
- [15] Wang L, Sheng M, Zhang Y, et al. Robust energy efficiency maximization in cognitive radio networks: The worst-case optimization approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(1): 51-65.
- [16] Mallick S, Devarajan R, Loodaricheh R A, et al. Robust resource optimization for cooperative cognitive radio networks with imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 907-920.
- [17] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 8(8): 4316-4328.
- [18] Liu Z, Wang J, Xia Y, et al. Robust optimisation of power control for femtocell networks[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(5): 360-367.
- [19] Li Y, Quevedo D E, Lau V, et al. Optimal periodic transmission power schedules for remote estimation of ARMA processes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(24): 6164-6174.

作者简介

刘志新(1976—), 男, 教授, 博士, 从事网络化系统控制与优化等研究, E-mail: lzauto@ysu.edu.cn;

高露(1991—), 女, 硕士生, 从事无线通信网络资源优化管理的研究, E-mail: gaolu9141@163.com;

袁亚洲(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事物联网技术与应用的研究, E-mail: yzyuan@ysu.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)