

文章编号:1007-5321(2017)02-0011-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.02.002

异构蜂窝网络中用户非均匀分布的 CRE 和 eICIC 优化

谭志远, 陈磊, 李曦, 纪红

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 在假设用户均匀分布的场景中,联合优化小区范围扩展(CRE)和增强型小区间干扰协调(eICIC)不适用用户分布非均匀的实际场景. 考虑到用户非均匀分布的特点,提出了相应的 CRE 和 eICIC 联合优化方案. 考虑到建模的复杂性,使用了斯坦伯格博弈建模 CRE 和 eICIC 的联合优化过程,将宏基站作为领导者决定 eICIC 策略,将 pico 基站作为跟随者决定 CRE 策略,进而提出一种求解算法,以获得斯坦伯格博弈均衡解. 仿真结果表明了所提出的斯坦伯格均衡解算法的收敛性及有效性.

关键词: 小区范围扩展; 增强型小区间干扰协调; 异构蜂窝网络; 斯坦伯格博弈

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Jointly Optimize CRE and eICIC in Heterogeneous Cellular Networks with Non-Uniform User Distribution

TAN Zhi-yuan, CHEN Lei, LI Xi, JI Hong

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As the effective methods to solve the load balance and interference control problem in heterogeneous cellular networks (HCN), cell range expansion (CRE) and enhanced inter-cell interference (eICIC) attract the attention of many researchers. However, most of the current works are under the assumption of uniform user distribution for simplicity, which is not applicable for the non-uniform user distribution scene. We intend to jointly optimize CRE and eICIC in HCN with non-uniform user distribution. Due to the complexity of the optimization problem, Stackelberg Game is used to model the optimization process of CRE and eICIC where macro base station (MBS) decides the eICIC strategy as leader and small cell base stations decide the respective CRE scheme as followers. Moreover, a solution algorithm is proposed to achieve the Stackelberg equilibrium (SE). The simulation results show the convergence of our proposed algorithm of SE and the effectiveness of our proposed solution.

Key words: cell range expansion; enhanced inter-cell interference coordination; heterogeneous cellular networks; Stackelberg game

异构蜂窝网络(HCN, heterogeneous cellular networks)在 3GPP 的 LTE-A 中,作为一种有效提升系统吞吐量的方案被广泛研究^[1]. 其中一个热点问题是设计小区范围扩展(CRE, cell range expansion)以

及增强型小区间干扰协调(eICIC, enhanced inter-cell interference coordination)^[1-2]. 基于 CRE 和 eICIC 的异构蜂窝网络性能取决于范围扩展偏置因子(REB, range expansion bias)和几乎空白子帧(ABS, almost

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 国家科技重大专项项目(2016ZX03001017); 国家自然科学基金面上项目(61671088)

作者简介: 谭志远(1990—), 男, 博士生, E-mail: tanzhiyuan@bupt.edu.cn; 纪红(1966—), 女, 教授, 博士生导师.

blank subframes) 的配置. 大量工作进行了相关研究^[3-9], 包括给定 REB 的情况下研究了 ABS 的配置问题^[3], 以及应用不同的方法联合优化 CRE 及 eICIC 来改善系统性能^[4-8]. 然而现有研究在设计资源配置时统一假设用户为均匀分布, 并未考虑用户分布特性的影响. 因此, 在假设用户分布非均匀的条件下, 联合优化 eICIC 和 CRE 配置; 考虑用户非均匀分布场景的复杂度, 使用斯坦伯格博弈建模优化问题, 并计算网络中最优的 ABS 密度及 pico 基站最优的 REB 配置.

1 系统模型

1.1 系统架构

异构蜂窝网络架构如图 1 所示, N_{pico} 个 pico 基站以频谱共享模式部署在一个宏基站 (MBS, macro cellular base station) 覆盖范围内, 即 pico 基站及宏基站可以在相同频段同时传输. 假设所有的 pico 基站发送功率相同, pico 基站及 MBS 发送功率分别为 P_p, P_m . 系统用户数为 N , 连接到 MBS 的用户为 N_m , 连接第 i 个 pico 基站的用户数为 $N_{p,i}$. 由于 pico 基站的小区范围扩展, pico 基站用户分为易受干扰的用户 (VUE, victim user equipments) 及普通用户类型, 且为两个互补子集合, 分别表示为 $N_{p,i}^v$ 和 $N_{p,i}^n$. $N_{p,i}^v$ 的值取决于偏置值 b_i 及用户分布密度 ρ_i . ABS 密度表示为 α . pico 基站在没有宏蜂窝干扰的情况下使用 ABS 给 VUE 发送数据. 剩余的子帧供宏蜂窝用户 (MUE, macro user equipments) 及 pico 基站普通用户使用. 分别定义 $u_m^j, u_{p,i}^j, \tilde{u}_{p,i}^j$ 为 MBS 中第 j 个用户, 第 i 个 pico 基站中第 j 个普通用户及第 j 个 VUE.

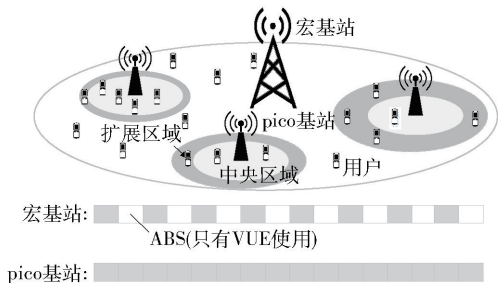


图1 网络架构

对于 MUE u_m^j , 受到来自所有 pico 基站的干扰, 其信干噪比表示为

$$\gamma_{u_m^j} = \frac{P_m |h_{m,u_m^j}|^2}{\sum_{i=1}^{N_{\text{pico}}} P_p |h_{p,i,u_m^j}|^2 + \sigma^2} \quad (1)$$

其中: h_{ij} 为基站 i 到用户 j 间的平均信道增益, σ^2 为噪声功率. 同理, pico 基站的普通用户受到来自 MBS 和其他 pico 基站的干扰, 其信干噪比表示为

$$\gamma_{u_{p(i)}^j} = \frac{P_p |h_{p,i,u_{p(i)}^j}|^2}{P_m |h_{m,u_{p(i)}^j}|^2 + \sum_{k=1, k \neq i}^{N_{\text{pico}}} P_p |h_{p,k,u_{p(i)}^j}|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

pico 基站中 VUE 使用 ABS 消除干扰, 所以仅受到来自其他 pico 基站的干扰, 其信干噪比表示为

$$\gamma_{u_{p(i)}^j} = \frac{P_p |h_{p,i,u_{p(i)}^j}|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^{N_{\text{pico}}} P_p |h_{p,k,u_{p(i)}^j}|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

由香农公式可得用户的传输速率

$$R_u = \ln(1 + \gamma_u) \quad (4)$$

1.2 问题描述

为了最大化异构蜂窝网络系统吞吐量, 实现负载均衡, 因此联合设计最优的 eICIC 和 CRE 方案. 进而需要得到 1) 最优的 ABS 密度 α ; 2) 每个 pico 基站对应的最优的 REB 值, 即 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_{\text{pico}}}]$.

为了改善系统吞吐量, MBS 将服务质量低的用户 VUE 分给 pico 基站从而减轻负载; 同时, 为了鼓励 pico 基站扩展覆盖范围实现分流, MBS 通过增加 ABS 密度 α 作为对 pico 基站的回报. 该过程可以建模为斯坦伯格博弈. 斯坦伯格博弈是一个策略博弈, 包括一个领导者及多个跟随者互相竞争资源. 建模 MBS 为领导者, pico 基站为跟随者. MBS 根据效用函数给出一个 ABS 密度值 α . pico 基站根据 MBS 的决策及效用函数计算 REB 值 β , 并且假设所有的 pico 基站理性且自私, 其目标是最大化各自的效用函数.

由于 MBS 及 pico 基站的同频部署, 临近 pico 基站的 MUE 受到严重的跨层干扰, 极大地降低了系统性能, 通过将信道条件差的用户分配到 pico 基站, 系统平均吞吐量增加, 并且为 MBS 分流. 因此, 定义所有用户平均吞吐量为 MBS 效用函数. 具体表示为

$$U_m(\alpha, \beta) = (1 - \alpha) \sum_{j=1}^{N_m} \frac{G(N_m)}{N_m} R_m^j +$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{pico}}} \left\{ (1-\alpha) \sum_{j=1}^{N_{\text{p},i}^n} \frac{G(N_{\text{p},i}^n)}{N_{\text{p},i}^n} R_{\text{p},i}^j + \alpha \sum_{j=1}^{N_{\text{p},i}^v} \frac{G(N_{\text{p},i}^v)}{N_{\text{p},i}^v} \tilde{R}_{\text{p},i}^j \right\} \quad (5)$$

其中, G 函数表示多用户分集增益, 可以表示为^[9]

$$G(N_m) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{1}{i} \quad (6)$$

N_m 取决于向量 β, β_i 的值越大表示更多的 MUE 被分配到第 i 个 pico 基站, MUE 数量较少. 另外, 在斯坦伯格博弈中, 对 $\forall i, \beta_i$ 是关于 α 的增函数; 因为仅当 ABS 密度增加时, pico 基站才愿意接纳更多的 VUE 并提供更好的服务, 进而表明 pico 基站的小区范围扩展取决于 ABS 密度. 然而, 当过分增大 ABS 密度时, MUE 可用资源减少, 导致 MBS 效用函数下降. 因此, MBS 必须确定最优的 ABS 密度值最大化效用函数, 具体通过解决以下问题实现.

问题 1:

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha} U_m(\alpha, \beta) \\ & \text{s. t. } 0 \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 在 pico 基站侧, 定义其效用函数为

$$\begin{aligned} U_{\text{p},i}(\alpha, \beta_i) = & (1-\alpha) \sum_{j=1}^{N_{\text{p},i}^n} \frac{G(N_{\text{p},i}^n)}{N_{\text{p},i}^n} R_{\text{p},i}^j + \\ & \alpha \sum_{j=1}^{N_{\text{p},i}^v} \frac{G(N_{\text{p},i}^v)}{N_{\text{p},i}^v} \tilde{R}_{\text{p},i}^j + C(N_{\text{p},i}^v) \end{aligned} \quad (8)$$

为了鼓励 pico 基站扩展小区范围, 定义 C 函数为激励函数, 且 C 函数关于 $N_{\text{p},i}^v$ 为递增的凸函数, 表示为

$$C(N_{\text{p},i}^v) = Q^* (1 - e^{-p^* N_{\text{p},i}^v}) \quad (9)$$

其中 Q 和 p 是常数.

由式(8)可知, 对于 pico 基站改善 REB 的回报主要体现在两方面: 一是 ABS 密度的增加带来平均吞吐量的收益; 二是激励函数的收益. 固定 ABS 密度的条件下, 当 pico 增加扩展偏置数值时, 更多的 MUE 分配到 pico 基站, 其回报将会增加. 然而, 随着偏置数值增加, 过多的 MUE 接入到 pico 基站, 由于通信距离增加及干扰, VUE 的信道质量降低, 导致 VUE 的平均吞吐量下降. 因此, 有必要选择最优的 CRE 偏置因子, 最大化 pico 基站的效用函数. 其问题建模为

问题 2:

$$\max_{\beta_i} U_{\text{p},i}(\alpha, \beta_i) \quad (10)$$

问题 1 与问题 2 联合构成了斯坦伯格博弈. 博弈的目标是找到斯坦伯格博弈均衡解 (SE, Stackel-

berg equilibrium), 从而保证领导者 (MBS) 及跟随者 (pico 基站) 无法单方面脱离 SE.

2 问题求解

2.1 算法设计

对于上述斯坦伯格博弈, SE 定义如下: 取 α^* 为问题 1 的一个可行解, β_i^* 为问题 2 的一个可行解, 当满足如下条件时, 对于所有的可行解 (α, β) , (α^*, β^*) 是斯坦伯格博弈的 SE.

$$U_m(\alpha^*, \beta^*) \geq U_m(\alpha, \beta^*) \quad (11)$$

$$\text{且 } U_{\text{p},i}(\alpha^*, \beta_i^*) \geq U_{\text{p},i}(\alpha^*, \beta_i), \forall i \quad (12)$$

为了求得 SE, 使用倒推法分析斯坦伯格博弈: 领导者 (MBS) 首先变化, 跟随者 (pico 基站) 相应做出变化. 首先, MBS 决定一个 ABS 密度 α 的策略, 下一步每个 pico 基站调整偏置因子 β_i , 决定扩展范围并优化效用函数.

对于一个给定的 ABS 密度 α , 通过求解问题 2, 每个 pico 基站选择一个最优的 REB. 由于 $N_{\text{p},i}^v$ 是离散的, 导致函数 $U_{\text{p},i}$ 非线性. 因此, 不能得到 β_i 的闭式解. 但是, 由于 MBS 接入的用户数量是固定的, 且 REB 最大值为 15 dB^[10], pico 基站通过研究所有可能的策略, 可以发现最优的 β_i . 令 β_i^* 表示问题 2 的最优解. 即

$$\beta_i^* = \arg \max_{\beta_i} U_{\text{p},i} \quad (13)$$

由于 MBS 通过 X2 接口得知 pico 基站的情况. 基于所有 pico 基站的最佳响应 $\beta^* = [\beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_{N_p}^*]$, 从而 MBS 确定 ABS 密度 α . 策略 α 通过求解问题 1 最大化效用函数来得到.

$$N_m = N - \sum_{i=1}^{N_{\text{pico}}} N_{\text{p},i} = N - \sum_{i=1}^{N_{\text{pico}}} N_{\text{p},i}^n - \sum_{i=1}^{N_{\text{pico}}} N_{\text{p},i}^v \quad (14)$$

式(14)表示 pico 基站小区扩展之后的 MUE 数量. 除了变量 α 外其他变量均已知, 容易求得变量 α 的值. 表示问题 1 的最优 α 值为 α^* . 则 MBS 的最优策略表示为

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} U_m \quad (15)$$

在获得 α^* 后, pico 基站根据 α^* 值继续调整 REB 获得最优的 β^* , 继而 MBS 继续依据 β^* , 重新计算新的 α^* . 在一定时间范围内, 直到 MBS 和 pico 基站的效用函数不再增加时, 博弈结束.

2.2 算法步骤

SE 求解算法步骤

步骤 1 MBS 根据历史信息寻找一个确定的 α 值.

步骤 2 迭代

```
while(  $U_m$  值增加)
    初始化  $\beta = [0, \dots, 0]$ 
    while(  $U_{p,i}$  值增加)
         $\beta_i = \beta_i + \delta$ 
        更新  $U_{p,i}$ 
    end while
    根据  $\alpha$  得到最优的  $\beta^*$ 
    根据  $\beta^*$  得到  $U_m$ 
    计算当下最优值  $\alpha$ 
end while
```

步骤 3 得到最优的 α^* 和 β^* .

3 仿真结果

在仿真部分,所有系统参数及假设均参考 LTE 标准^[10]. 表 1 总结了重要的仿真参数,采用文献 [10]中郊区部署下的路径损耗模型. 所有 pico 基站可以选择各自最优的 REB,而非同一个数值,更符合场景中用户非均匀分布的特点.

表 1 关键仿真参数			
模型	参数	MBS	pico 基站
系统模型	小区范围/m	500	50
	载波频率/MHz	2 000	
	系统带宽/MHz	1.4	
	资源块大小/kHz	180	
	最大发送功率/dBm	46	30
	天线增益/dBi	14	0
	噪声因数/dB	5	8
	高斯白噪声功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174	
	最小耦合损耗/dB	80	45
传播模型	阴影衰落标准差/dB	8	4
流量模型	数据生成	满缓存	
	调度策略	轮询调度	

图 2 仿真了一个 pico 基站在不同的 ABS 密度中的效用函数值. 如图 2 所示,起初 pico 基站的效用值随着 REB 增加而增加,后随着 REB 的进一步增加而下降. 并且 α 的值越大,效用函数值也越大. pico 基站效用函数最大值随着 α 增加而增加. 该结果可以理解为:pico 基站基于偏置因子扩展小区范

围,更多的 MUE 成为 VUE,激励函数的存在使 pico 基站的效用函数增加. 然而,如果太多用户接入 pico 基站,导致更多的 VUE 信道条件变差,降低了 pico 基站的性能. 而 ABS 密度 α 增大,VUE 可以使用更多的 ABS 资源,因此,pico 基站效用值更好,且最大值变慢.

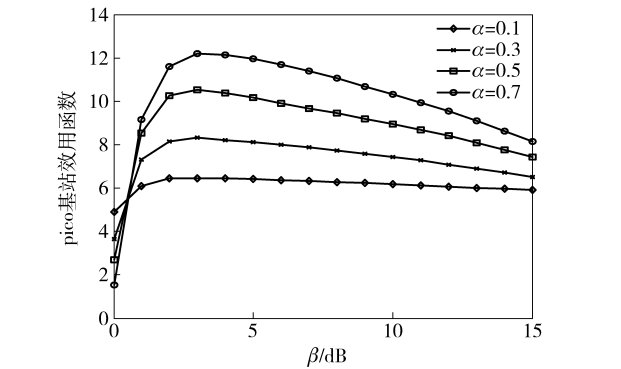


图 2 不同 α 和 β 值下的 pico 基站效用值

图 3 揭示了 MBS 的效用值与 α 及 pico 基站数量的关系. 当 α 值较低时提高 α 值,导致 pico 基站增加 REB,进而临近 pico 基站的 MUE 接入 pico 基站. 然而,当 α 过分增大时,MBS 的效用值下降. 由分析知剩余的非 ABS 密度太低,不能满足 MUE 的需求. 另外,可以看出在不同 pico 基站数量下的最优值 α^* 不同,8 基站的 α^* 大于 4 基站的 α^* ,因为当 MUE 数量较多时,pico 基站越多时,可以接入 MUE 的数量越多,作为回报 MBS 释放更多的时隙资源.

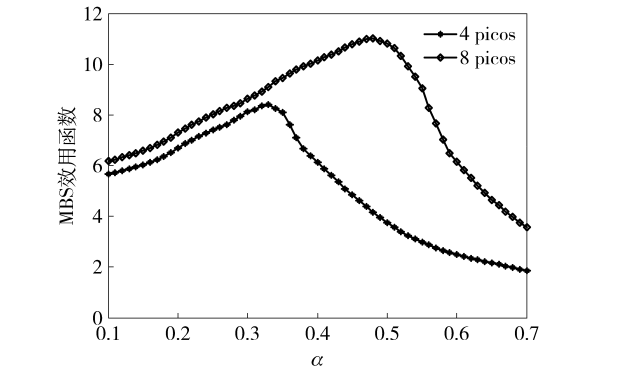


图 3 不同 pico 基站数量和 α 值的 MBS 效用值

图 4 表明了 SE 求解算法的收敛性. 设定 4 个 pico 基站用户密度逐渐增加,如图所示,MBS 及所有 pico 基站在 120 ms 之后达到收敛,并且得到 $\alpha = 0.32, \beta = [3, 5, 8, 10]$. 在仿真中,MBS 每 10 ms 调整一次 α 值,pico 基站相应地从 0 开始调整 β ,导致

pico 基站的非线性增长. 另外, 用户密度高的 pico 基站的效用值及最优 REB 值胜于用户密度低的 pico 基站. 因为用户分布密度高的平均信道质量更好.

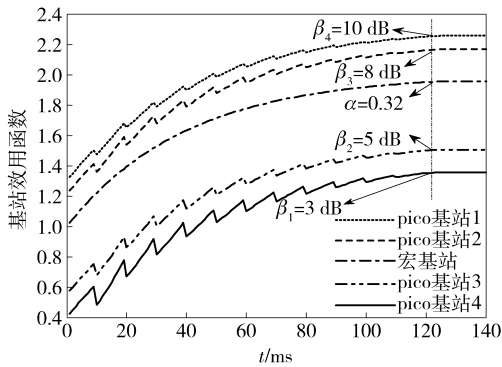


图 4 MBS 和 pico 基站效用函数的收敛性

4 结束语

研究了在用户非均匀分布的异构蜂窝网络中, 联合优化 CRE 及 eICIC 的问题. 通过分析在 CRE 中的参数 REB 及 eICIC 中的参数 ABS 密度, 构建了斯坦伯格博弈的联合优化问题, 并且在博弈中, MBS 作为领导者决定 ABS 密度, pico 基站作为跟随者决定 REB. 另外, 提出了迭代的求解算法获得 SE. 最终, 仿真结果表明了提出的 SE 算法的有效性, 并验证了针对用户非均匀分布场景下联合优化 CRE 及 eICIC 方案性能的优越性.

参考文献:

- [1] Pedersen K I, Wang Y, Strzyz S, et al. Enhanced inter-cell interference coordination in co-channel multi-layer LTE-advanced networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(3): 120-127.
- [2] Pang Jiyong, Wang Jun, Wang Dongyao, et al. Optimized time-domain resource partitioning for enhanced Inter-cell interference coordination in heterogeneous networks[C] // 2012 IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC2012). Shanghai: IEEE Press, 2012: 1613-1617.
- [3] Singh S, Andrews J G. Joint resource partitioning and off-loading in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 888-901.
- [4] Yamamoto K, Ohtsuki T. Parameter optimization using local search for CRE and eICIC in heterogeneous network[C] // 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Washington DC: IEEE Press, 2014: 1536-1540.
- [5] Deb S, Monogioudis P, Miernik J. Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(1): 137-150.
- [6] Zhou Hao, Ji Yusheng, Wang Xiaoyan. ADMM based algorithm for eICIC configuration in heterogeneous cellular networks[C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications. Kowloon: IEEE Press, 2015: 343-351.
- [7] Grøndalen O, Mahmood K, Østerbø O N. On attachment optimization and muting pattern selection in eICIC[C] // 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Valencia: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [8] Zhou Hao, Ji Yusheng, Wang Xiaoyan, et al. eICIC configuration algorithm with service scalability in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 520-535.
- [9] Bu T, Li L, Ramjee R. Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks[C] // 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona: IEEE Press, 2006: 1-12.
- [10] 3GPP TSG RAN WG4. R4-092042—2009, Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements[S]. San Francisco: Alcatel-Lucent, picoCHip Designs, Vodafone, 2009.