

未来 5G 通信中基于协同感知的能量有效性优化算法

崔翠梅^{1,2,3}, 朱锡芳¹, 金石², 汪一鸣³

(1 常州工学院 电气与光电工程学院, 江苏 常州 213032; 2 东南大学 移动通信
国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 3 苏州大学 城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215021)

摘 要: 针对未来 5G 通信网络频谱资源紧缺、高吞吐量和低功耗需求等难题, 研究了如何提高频谱资源利用率和能量有效性. 首先, 基于协同频谱感知方法和动态时分多址接入机制构建了 5G 认知网络模型. 其次, 推导出能量有效性函数表达式, 并给出多目标优化函数, 利用帕累托最优化方法将非凸函数转化为凸函数求取全局最优解. 最后, 通过仿真验证所提能量有效性优化算法在保证感知准确性和时间敏捷性的同时, 获得比其他两种方法更高的性能.

关键词: 能量有效性; 认知无线电; 协同频谱感知; 微微小区; 家庭基站

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)12-0001-04

Cooperative Spectrum-aware Energy-Efficiency Optimization for 5G Communications

CUI Cui-mei^{1,2,3}, ZHU Xi-fang¹, JIN Shi², WANG Yi-ming³

(1 School of Electrical and Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou
213032, China; 2 National Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3 School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: To address the issues of spectrum inefficiency, high throughput, and low power consumption in 5G communications, we study the spectrum efficiency and energy efficiency issues. First, 5G cognitive network model, where cognitive femtocell coexist with picocell, was built based on cooperative spectrum sensing scheme and dynamic time-division multiple-access scheduling mechanism. Then, formulate energy efficiency function and optimization problem with respect to transmission power. To resolve the non-convexity of the formulated optimization problem, Pareto-optimal solution was involved in global optimality. The simulation results show that the proposed schemes significantly enhance the energy efficiency of the cognitive femto user compared with another schemes, and ensure the accuracy and time agility of spectrum sensing.

Key words: energy-efficiency; cognitive radio; cooperative spectrum sensing; picocells; femtocells

1 引言

未来 5G 网络相比 4G 网络要满足千倍容量增长的需求^[1]. 为了提高系统吞吐量, 5G 网络中异构网络互存共融现象持续增长, 如宏蜂窝 (macro-cells)、微微小区 (picocells) 和家庭基站 (femtocells)

共存.

但异构网络间难以互通, 造成无线频谱资源浪费, 而且网络间相互干扰, 降低网络服务质量和用户体验, 因此, 频谱利用率成了 5G 异构网络目前面临的主要挑战之一. 为了解决这个难题, 认知无线电 (Cognitive Radio, CR)^[2] 技术已被融入家庭基站,

收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61471252); 常州市应用基础研究计划项目 (CJ20160054); 江苏高校文化创意协同创新中心重点项目 (XYN1505); 常州工学院自然科学基金重点项目 (YN1504)

具有 CR 功能的家庭基站^[3-4]能感知和自适应周围通信环境. 在 CR 网络模型中, macrocells 和 pico-cells 基站相当于主用户 (Primary Users, PUs), CR femtocell 基站相当于认知用户 (Secondary Users, SUs).

另一方面, 5G 网络中能量有效性也是面临的主要难题之一, 越来越受到关注, 旨在解决急剧增长的能源消耗问题. 目前, 关于频谱感知的能量有效性优化问题已有一些研究^[5-7]. 文献[6]中考虑了一个单用户感知的频谱共享系统, 基于感知结果的硬判决规则, 提出了最佳功率控制方法以最大化能量有效性, 但对于受多径、阴影等因素影响的复杂异构网络环境, 感知结果的准确性将受到严重影响, 进而降低能量有效性. 文献[7]中研究了 underlay 随机认知网络安全通信, 频谱效率和能量有效性的折中, 给出了关于认知用户传输功率和分布密度的迭代优化算法, 但并未考虑复杂环境的协同感知. 所以, 文献[5-7]主要针对有较强信号的 PU, 对于信号强度较弱或能量有限的 PU 性能会受到严重影响.

基于上述分析, 针对传输功率较弱的 picocells 基站和能量有限的认知 femtocells 基站共存的 5G 异构网络, 提出了基于双次协同频谱感知方案和动态感知调度机制^[8-9]进行能量有效性研究, 通过帕累托最优化方法将非凸优化目标函数转化为凸函数求取全局最优解, 以提高感知的准确性和时间敏捷性, 同时减少能量消耗.

2 基于协同感知的网络模型

为便于讨论分析, 构建一个由 femtocell 与 picocell 共存的 5G 异构认知网络模型. 此模型中, femtocell 假设为认知网络, 由 K 个认知 femto 用户和一个 femto BS 基站组成, 其中 femto 用户设为认知用户发射机 (Secondary User Transmitter, SU-TXs), femto BS 基站设为认知用户接收机 (Secondary User Receiver, SU-RX); picocell 假设为主用户网络, 由 N 个 pico 用户和一个 pico BS 基站组成, 这意味主用户网络有 N 个授权信息, pico 用户设为主用户接收机 (Primary User Receivers, PU-RXs), pico BS 基站设为主用户发射机 (Primary User Transmitter, PU-TX), 如图 1 所示. PU-RXs 和 SU-TXs 都为单天线用户, 第 n 个 PU-RX 和第 k 个 SU-TX 分别标识为 PU-RX _{n} 和 SU-TX _{k} , $n \in N \triangleq \{1, \dots, N\}$, $k \in \kappa \triangleq \{1, \dots, K\}$, PU-TX 和 SU-RX 分别有 L 和 M 根天线 ($M \geq K$). SU-RX 用迫零接

收器同时检测 K 个 SU-TXs 在同频带上发射的信号, 并收集 SU-TXs 的感知结果和 SU-TX 与 PU-RXs 间的信道交互信息, 以实现协同频谱感知和集中功率控制. 同时假设认知网络与主用户网络以 underlay 的模式工作, 即认知用户与主用户不会同时在同一个控制信道工作.

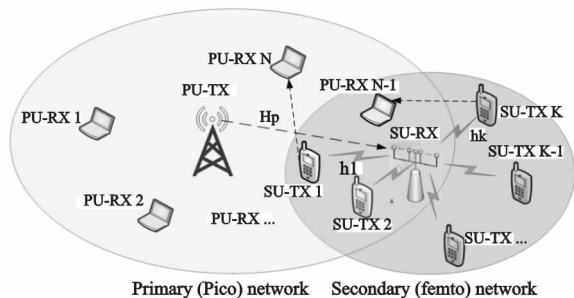


图 1 5G 异构认知网络模型

主用户网络 (picocell) 以时隙周期 T 的同步时分双工模式工作, PU 在各频带的工作时间为独立同分布的 ON/OFF (H_1/H_0) 开关切换过程. 认知网络 (femtocell) 工作时隙由频谱感知时隙 τ 和数据传输时隙 $T-\tau$ 两部分组成. 在频谱感知阶段, 由于 pico 和 femto 用户发射功率较低, 为提高频谱感知的准确性和时间敏捷性, 采用基于能量检测的双次协同感知理论和动态时分多址接入 (Dynamic and Variable Time-Division Multiple-Access, DV-TDMA) 的感知调度机制^[8-9], 认知用户 SU-TXs 感知判决主用户是处于工作状态 ($\hat{H}_1$), 还是空闲状态 ($\hat{H}_0$). 那么, 感知 PU-TX 和 PU-RX _{n} 间是否通信, 即信道 n 是否空闲的协同检测概率和虚警概率分别为

$$p_d^{(n)} = \sum_{x=u}^K \binom{K}{x} (p_{c,k}^{(n)})^x (1 - p_{c,k}^{(n)})^{K-x} \quad (1)$$

$$p_f^{(n)} = \sum_{x=u}^K \binom{K}{x} (p_{f,k}^{(n)})^x (1 - p_{f,k}^{(n)})^{K-x} \quad (2)$$

协同感知时间 τ 为

$$\tau^{(n)} = \frac{T_1 + (1 - \frac{p_{c,k}^{(n)} + p_{n,k}}{2}) T_2 + (1 - p_{c,k}^{(n)}) (1 - p_{n,k}) T_3}{1 - (1 - p_{c,k}^{(n)}) (1 - p_{n,k}) (1 - p_d^{(n)})} \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中, $p_{c,k}^{(n)}$, $p_{f,k}^{(n)}$ 和 $p_{n,k}$ 分别表示 SU-TX _{k} 基于中继的协同感知概率、虚警概率和中继用户独立检测概率, 其详细表达式见文献[8-9], T_1, T_2, T_3 为 DV-TDMA 机制的时隙长度, 其中 T_3 根据认知用户数可调, 以实现最优的感知时间敏

捷性.

然后根据感知判决结果 $\hat{H}_j$, SU-RX 确定第 k 个 SU-TX 在信道 n 的发射功率为 $P_{k,j}^{(n)}$ 并前传给相应 SU-TX, $k \in \kappa, j \in B \triangleq \{0,1\}$.

在数据传输阶段,根据感知判决结果 $\hat{H}_j$, K 个 SU-TXs 以发射功率 $\{P_{k,j}^{(n)}\}_{k=1}^K$ 给 SU-RX 传输数据. 那么, SU-RX 接收到一组 $M \times 1$ 维的信号矢量^[10]:

$$y_r = \begin{cases} \sum_{k \in \kappa} h_k \sqrt{P_{k,j}^{(n)}} x_{s,k} + w_r, H_0 \\ \sum_{k \in \kappa} h_k \sqrt{P_{k,j}^{(n)}} x_{s,k} + H_p q x_p + w_r, H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, h_k 是 SU-TX $_k$ 和 SU-RX 间的信道增益, H_p 是 PU-TX 与 SU-RX 间的信道增益, $x_{s,k} \sim CN(0,1)$ 是 SU-TX $_k$ 的均值为 0, 方差为 1 的高斯随机变量, $w_r \sim CN(0, \sigma_r^2 I)$ 是 SU-RX 接收的高斯随机噪声. SU-RX 通过 $U = (H^H H)^{-1} H^H$ 执行迫零检测, $H = [h_1, \dots, h_K]$ 是 SU-TXs 和 SU-RX 间 $M \times K$ 维信道增益矩阵. 那么根据 PU-TX 的活动状态及协同感知结果对 $(H_i, \hat{H}_j)$, $i = \{0,1\}$, SU-TX $_k$ 在信道 n 可实现的数据传输速率为

$$\begin{aligned} (H_0, \hat{H}_0): r_{k,00}(P_{k,0}^{(n)}) &= \rho \log_2(1 + \gamma_{k,0}^{(n)} P_{k,0}^{(n)}) \\ (H_1, \hat{H}_0): r_{k,10}(P_{k,0}^{(n)}) &= \rho \log_2(1 + \gamma_{k,1}^{(n)} P_{k,0}^{(n)}) \\ (H_0, \hat{H}_1): r_{k,01}(P_{k,1}^{(n)}) &= \rho \log_2(1 + \gamma_{k,0}^{(n)} P_{k,1}^{(n)}) \\ (H_1, \hat{H}_1): r_{k,11}(P_{k,1}^{(n)}) &= \rho \log_2(1 + \gamma_{k,1}^{(n)} P_{k,1}^{(n)}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\rho = (T - \tau^{(n)})/T$, $\gamma_{k,0}^{(n)} = ([\sigma_r^2 U U^H]_{k,k})^{-1}$, $\gamma_{k,1}^{(n)} = ([U(\sigma_p^2 H_p q q^H H_p^H + \sigma_r^2 I) U^H]_{k,k})^{-1}$ 分别是在 SU-TX $_k$ 在状态 H_0 或 H_1 的有效信道功率增益. 那么, 考虑 $(H_i, \hat{H}_j)$ 所有状态情况, SU-TX $_k$ 在信道 n 可实现的平均吞吐量为

$$\bar{r}_k^{(n)}(P_k) = \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} p_{ij} r_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)}) \quad (6)$$

式中 $P_k = [P_{k,0}^{(n)}, P_{k,1}^{(n)}]$ 是发射功率矢量, $p_{ij} = \Pr[\hat{H}_j | H_i] \cdot \Pr[H_i]$ 是 $(H_i, \hat{H}_j)$ 的概率.

3 能量有效性优化

本文构建能量有效性 EE (energy efficiency) 的优化问题与平均吞吐量、总能耗均有关, 能量有效性定义为每单位能耗所获得的期望吞吐量. 由于各 SU-TX 需要消耗各自的能量获取吞吐量 $r_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)})$, 所以本文考虑单个用户的 EE 优化而取代系统 EE 优化. 由式(6)可得, SU-TX $_k$ 在信道 n 的平均能量有效性函数表达式为:

$$\eta_k^{(n)}(P_k) = \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} p_{ij} \eta_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)}) \quad (7)$$

其中

$$\eta_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)}) = \frac{r_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)})}{\rho P_{k,j}^{(n)} + P_{k,c}^{(n)}} \quad (8)$$

式中, $P_{k,c}^{(n)}$ 指 SU-TX $_k$ 的电路能耗.

为了实现 SU-TX $_k$ 最优的能量有效性, 并保证 PU 服务质量, 各信道的检测错误率不能大于最大允许错误率 ϵ , 且在其最大平均发射功率 $P_{\max,k}$ 和最大平均干扰功率 $I_{\max,n}$ 允许的范围内, 寻找其最佳发射功率. 因此, 由式(7), 优化目标函数构建如下:

$$\max_{\{P_k\}_{k=1}^K} \eta \triangleq [\eta_1(P_1), \dots, \eta_K(P_K)] \quad (9)$$

$$s. t. 1 - p_d^{(n)} + p_f^{(n)} \leq \epsilon, n \in N \quad (10)$$

$$\rho[(p_{00} + p_{10})P_{k,0}^{(n)} + (p_{01} + p_{11})P_{k,1}^{(n)}] \leq P_{\max,k}, k \in \kappa \quad (11)$$

$$\rho \sum_{k \in \kappa} |g_{k,n}|^2 (p_{10} P_{k,0}^{(n)} + p_{11} P_{k,1}^{(n)}) \leq I_{\max,k}, n \in N \quad (12)$$

约束项(12)中 $g_{k,n}$ 为 SU-TX $_k$ 与 PU-RX $_n$ 间的信道增益系数.

为发现一个全局最优解, 首先将上述多目标优化函数(9)标量化成加权和形式以求帕累托最优化解^[10], 即:

$$\eta(P) = \sum_{k \in \kappa} w_k \eta_k(P_k) = \sum_{k \in \kappa} \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} w_k p_{ij} \eta_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)}) \quad (13)$$

式中 $\{w_k\}_{k=1}^K$ 是加权因子, $P = [P_1^T, \dots, P_K^T]^T$ 是功率分配矩阵. 其次, 求另一功率约束 $P_{k,j}^{(n)} \leq P_{k,j}^*$, 即^[10]

$$P_{k,j}^* \triangleq \operatorname{argmax}_{i \in B} \sum_{i \in B} w_k p_{ij} \eta_{k,ij}(P_{k,j}^{(n)}) \quad (14)$$

则优化问题转化为

$$\begin{aligned} \max_P \eta(P) \\ s. t. (10)-(12) \\ P \in F_{op} = \{P \mid 0 \leq P_{k,j}^{(n)} \leq P_{k,j}^*, k \in \kappa, j \in B\} \end{aligned} \quad (15)$$

最后, 构建拉格朗日方程求解最优解, 即:

$$L(P, \lambda, \mu) = \eta(P) - \sum_{k \in \kappa} \lambda_k f_{P,k}(P_k) - \sum_{n \in N} \mu_n f_{I,n}(P) \quad (16)$$

由文献[10]知, $L(P, \lambda, \mu)$ 是一个凸函数, 通过 $\partial L / \partial P_{k,j}^{(n)} = 0$, 可得最优分配功率 $P^*(\lambda, \mu)$.

4 性能评估

本节通过仿真进行性能分析. 仿真参数设置: 假设各 SU-TXs 有相同的发射功率, 最大发射功率限信噪比为 10 dB, 对主用户信号感知能力相同, 感知

错误率 $\epsilon = 0.01$, SU-TXs 数 $K = 100$, PU-RXs 数 $N = 2$, 感知周期 $T = 100$ ms, DV-TDMA 机制中感知时隙 $T_1 = T_2 = 10$ ms, 微时隙 $t = 0.2$ ms, PU-TX 活动 ON/OFF 状态概率为各为 0.5.

图 2 描述了 SU-TXs 发射功率为 0 dB 时的能量有效性, 可以发现通过优化算法处理能量有效性明显优于其它两个没有优化算法处理的性能, 同时保证感知错误率小于 $\epsilon = 0.01$. 此外, 通过图 3 可知, 当 SU-TX 发射功率由 0 dB 增加到 5 dB, 能量有效性反而明显降低, 所以, 当感知到频谱空闲时, SU-TX 应选择合适的发射功率传输数据, 减少能量损耗. 因此, 所提基于协同感知的能量有效性优化算法更适合于发射信号强度较弱的 5G 通信网络中的 femtocells 和 picocells.

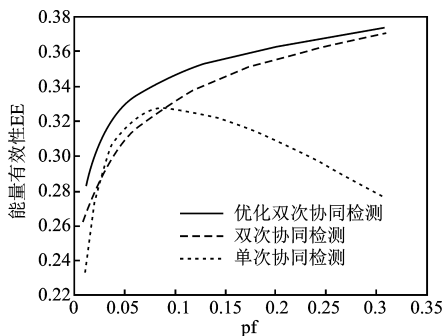


图 2 EE 优化性能比较

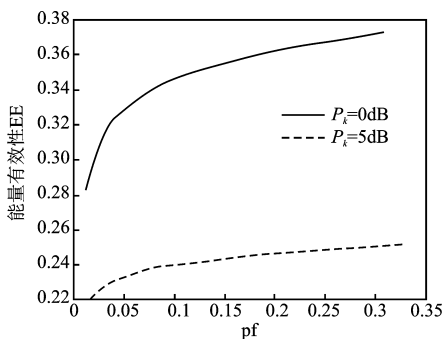


图 3 不同发射功率对优化 EE 影响

5 结束语

本文针对未来 5G 通信网络环境中的 femto 家庭基站和 pico 微微小区, 构建了 5G 异构认知网络模型, 提出了基于协同频谱感知的能量有效性优化算法. 该方法不仅可以提高频谱的感知准确性和时间敏捷性, 而且明显提高了能量有效性, 同时可以最优化 femto 用户发射功率, 减少能量消耗.

参考文献:

- [1] Wang C X. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2):122-130.
- [2] Mitola J, Maguire G Q Jr. Cognitive radios: Making software radio more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] Huang L, Zhu G. Cognitive femtocell networks: An opportunistic spectrum access for future indoor wireless coverage. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2):44-51.
- [4] Park H, Hwang T. Optimal beamforming and power allocation for cognitive femto base stations based on soft decision[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(5):878-895.
- [5] 杨威, 管东林, 逯东辉, 等. 面向认知无线网络能量高效协作感知的在线节点选择算法[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 103-110.
- [6] Ozcan G, Gursay M C. Energy-efficient power adaptation for cognitive radio systems under imperfect channel sensing [C]//IEEE INFOCOM Workshops. IEEE, 2014:706-711.
- [7] Xu X, Yang W, Cai Y, et al. On the secure spectral-energy efficiency tradeoff in random cognitive radio Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(10):2706-2722.
- [8] CUI C, WANG Y. Time agility optimization for dual-stage collaborative spectrum[J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23(2): 399-402.
- [9] CUI C, WANG Y. Analysis and optimization of sensing reliability for relay-based dual-stage collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(4): 2321-2337.
- [10] Park H, Hwang T. Energy-efficient power control of cognitive femto users for 5G communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4):772-784.

作者简介:

崔翠梅 女, (1978-), 博士, 博士后, 讲师. 研究方向为认知无线电、认知网络、5G 关键技术.

朱锡芳(通讯作者) 男, (1965-), 博士, 教授. 研究方向为图像处理、模式识别、图像质量评估.

E-mail: zhuxfcz@yeah.net.