

## 基于信干比的认知无线电自适应功率控制算法

程世伦 杨震

(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

**摘要:** 该文以空时编码(STBC) MC-CDMA 网络系统为认知无线电通信平台, 将一种基于 SIR 的非合作功率控制博弈算法应用于该认知无线电系统, 并根据用户的 SIR 需求差异, 对算法改进设计出新的自适应功率控制博弈算法(CR-NCPCG)。仿真结果表明 CR-NCPCG 算法以不同用户 SIR 需求为前提, 通过不同用户功率的有效控制, 实现了用户公平共享频谱资源的需求。

**关键词:** 认知无线电; 非合作功率博弈; 自适应函数; SIR

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)01-0059-04

## Adaptive Power Control Algorithm Based on SIR in Cognitive Radios

Cheng Shi-lun Yang Zhen

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Aiming at the discrepancies of the Signal-to-Interference Ratio (SIR) among different users in Cognitive Radios (CR), a Nash game algorithm for SIR-based power control was adopted and a novel adaptive algorithm was designed based on a Space-Time Block Coding MC-CDMA (STBC MC-CDMA) system. Simulation results show that the novel algorithm can regulate their transmitter powers to meet the different SIR requirements effectively and the anti-interference performance of CR system is improved obviously.

**Key words:** Cognitive radio; Non-cooperative power control game; Adaptive function; Signal-to-interference ratio

### 1 引言

随新一代无线移动通信对带宽的巨大需求, 无线频谱已成为现代社会不可或缺的宝贵的资源, 在许多频段频谱接入是比频谱物理稀缺更重要的问题, 无线频谱共享技术成为新一代无线移动通信的核心技术, 认知无线电充分利用频谱资源实现频谱共享, 解决未来频谱资源短缺(尤其低频段)和现有频谱资源未被充分利用的矛盾。2006年, IEEE 802.22工作组公布了基于认知无线电技术的WRAN(Wireless Regional Area Network)协议草案, WRAN作为新一代无线通信技术覆盖范围可达100km, 远高于现有的802网络; 因此, 研究认知无线电环境下的不同用户功率控制尤为重要<sup>[1,2]</sup>, 通常的功率控制最优化技术有: 拉式释限法(Lagrangian relaxation), 经典法, 二次规划法, 博弈论和几何规划法<sup>[3]</sup>, 博弈论着重于紧缺资源系统问题的分布式求解, 博弈的目标是分布式的最优; 在认知无线电环境中, 认知用户(secondary users)公平的共享频谱资源, 存在QoS需求的差异, 体现在SIR阈值不一, 功率控制算法以满足用户公平性为基础, 通过对用户功率的有效控制, 实现用户QoS的性能需求。

目前认知无线电环境下的多用户功率控制技术尚处于研究初始阶段, 研究主要集中在认知无线电环境特性要求, 网络收敛性等方面, 对功率控制限于特定环境的博弈框架<sup>[4,5]</sup>。Koskie-Gajic在IS-95平台基础上, 提出一种基于信干比(SIR)的功率控制博弈算法<sup>[6]</sup>, Koskie-Gajic算法通过控制SIR上限阈值以降低用户功率消耗, 存在系统用户容量冗余而部分用户SIR不能满足用户要求的问题, 无法适应认知无线电环境需要, 文献[7]的功率控制算法只限制SIR的下限阈值, SIR的提高以牺牲部分功率为代价, 经典的SIR平衡算法维持SIR恒定同样存在功率浪费问题<sup>[6]</sup>。本文利用认知无线电特有的频谱共享特性, 为确保系统的传输链路质量和容量, 采取空时编码(STBC) MC-CDMA通信平台, 将Koskie-Gajic的控制思想应用于认知无线电系统, 选取一种自适应反馈函数以控制环境噪声和多址干扰的影响, 考虑SIR的最低目标阈值, 对该算法进行改进, 设计出新型自适应功率控制博弈算法(CR-NCPCG), CR-NCPCG算法可以根据系统环境噪声和多址干扰强度, 自适应调节发射功率和输出SIR, 满足不同用户输出SIR需求。

第2节介绍系统模型, 第3节介绍 CR-NCPCG 自适应功率控制算法, 第4节是算法仿真与性能分析, 第5节是结论。

### 2 系统模型

在认知无线电环境中, 改进的 STBC MC-CDMA 通信

2006-09-06 收到, 2007-10-26 改回

国家自然科学基金(60772062), 教育部重点科技项目(206055)和江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(06KJA51001)资助课题

系统可方便保护授权用户(licensed users), 并降低认知用户的中断概率<sup>[7]</sup>, 且MC-CDMA结合CDMA和OFDM的优点, 具有系统容量高和良好的抗干扰能力, 易于达到最佳的频谱利用率; 因此, 本文选取STBC MC-CDMA平台作为认知无线电通信系统, STBC采用Tarokh-Jafarkhani建议的 $2 \times 2$ 矩阵<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} b_{k,1} & b_{k,2} \\ -b_{k,2}^* & b_{k,1}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

在发送端配置两根天线, 用户 $k$ 经空时分组编码分成两路, 对应两根发射天线, 每路信号经串并变换后与用户 $k$ 的扩频序列 $C_k = [c_k(1), \dots, c_k(n), \dots, c_k(N)]$  ( $n$ 表示第 $n$ 个载波, 扩频增益为 $N$ )相乘, 经过傅里叶逆变换, 形成 $N$ 个时间点内离散数据, 经串并变换加保护间隔后, 由相应天线发射出去。在接收端配置一根天线, 通过相应反变换, 信道估计和译码判决, 得到原发送信息; 考虑2个符号周期的系统对称性, 则第 $k$ 个用户的信干比(SIR)  $\gamma_k$ 可表示为<sup>[7]</sup>

$$\gamma_k = \frac{\left| \sum_{n=1}^N d_{k,1} \right|^2 p_k}{\sum_{i \neq k, i=1}^M \left| \sum_{n=1}^N I_{m,1} \right|^2 p_i + N\delta^2} \quad (2)$$

式中 $p_k, p_i$ 为第 $k, i$ 用户的发送功率,  $I_{m,1}$ 是子载波信号干扰, 为与经典功率控制SIR表达式一致, 上式可改写为

$$\gamma_k = \frac{\tilde{h}_{kk} p_k}{\sum_{i \neq k, i=1}^M \tilde{h}_{ki} p_i + \nu_k} \quad (3)$$

式中 $\nu_k$ 表示第 $k$ 个用户接收信号的噪声功率, 是服从高斯分布的噪声, 均值为0, 方差 $N\delta^2$ ; 令 $\gamma_k^{\text{th}}$ 表示第 $k$ 个用户的信干比目标阈值, 用户对输出SIR的期望目标是

$$\gamma_k \geq \gamma_k^{\text{th}}, \forall k \quad (4)$$

### 3 CR-NCPCG 算法

考虑理性的认知用户追求个体效用最大化, 不同理性用户的功率控制可转化为非合作功率控制博弈问题, 令 $G = [M, \{\mathbf{p}\}, \{u_k(\cdot)\}]$ 表示认知无线电非合作功率和SIR博弈策略, 其中 $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 为用户数集合,  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T$ 为用户发射功率, 则第 $k$ 个用户的成本函数(cost function)  $u_k(\cdot)$ 为<sup>[6]</sup>

$$u_k(p_k, \gamma_k(p_k)) = a_k p_k + b_k (\gamma_k^{\text{th}} - \gamma_k)^2, \forall p_k, \forall k = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中 $u_k$ 是非负的凸函数;  $a_k, b_k$ 是第 $k$ 个用户功率和信干比影响系数;  $\gamma_k$ 是第 $k$ 个用户的SIR;  $\gamma_k^{\text{th}}$ 为信干比目标阈值;  $p_k$ 为第 $k$ 用户发射功率, 功率控制博弈算法的目标是实现成本最低。而非合作功率控制博弈的纳什均衡指存在一系列功率 $p_1^*, p_2^*, \dots, p_M^*$ 和 $\gamma_1^*, \gamma_2^*, \dots, \gamma_M^*$ , 任何用户单方面改变发射功率都不能降低系统成本而获得额外收益, 存在第 $k$ 个用户的发射功率和输出SIR满足

$$u_k(p_k^*, \gamma_k(p_k^*)) \leq u_k(p_k, \gamma_k(p_1^*, p_2^*, \dots, p_{k-1}^*, p_k, p_{k+1}^*, \dots, p_M^*)), \quad \forall p_k, \forall k = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

令 $u_k(p_k^*, \gamma_k(p_k^*))$ 梯度为0,  $I_{k(p-k)} = \sum_{i \neq k, i=1}^M \tilde{h}_{ki} p_i + \nu_k$ , Koskie-Gajic算法的迭代函数为<sup>[6]</sup>

$$p_k^{(i+1)} = \gamma_k^{\text{th}} \frac{p_k^{(i)}}{\gamma_k^{(i)}} - \lambda_k \left( \frac{p_k^{(i)}}{\gamma_k^{(i)}} \right)^2 \quad (7)$$

式中参数 $\lambda_k = a_k / (2b_k)$ 的选取需保证 $p_k \geq 0$ ,  $\gamma_k^{\text{th}}$ 为第 $k$ 个用户期望SIR, 由式(7)可迭代得第 $k$ 个用户的最优解 $p_k^*, \gamma_k^*$ 。Koskie-Gajic算法中通过控制用户SIR以降低用户功率的消耗, 但在克服环境噪声和多址干扰方面性能欠佳, 即使系统用户容量充足且用户数目较少, 部分用户的输出SIR仍远低于期望值而无法达到用户SIR要求, 这对于频谱资源共享的认知无线电多用户通信而言, 资源冗余而部分用户需求却无法得到满足显然是不公平的; 换言之, 在认知无线电环境中, Koskie-Gajic算法的纳什均衡解已无意义, 为此保留Koskie-Gajic算法的收敛性和低功率消耗优势, 降低环境噪声和多址干扰的影响, 对该算法改进, 本文设计出一种适合认知无线电环境的自适应控制博弈算法(CR-NCPCG); 为便于描述, 令 $\gamma_k^{\text{min}}$ 为满足用户最低通信需求的SIR保障阈值, 则不同用户可根据QoS性能灵活的选择 $\gamma_k^{\text{th}}, \gamma_k^{\text{min}}$ 。

对输出SIR状态有限的多用户功率控制可转化为随机博弈问题, 随机博弈存在完美马尔可夫均衡, 用户功率改变取决于前一阶段的SIR状态和发射功率, 存在转移概率 $q(\gamma^{t+1} | \gamma^t, p^t)$ , 已知时间 $t$ 的状态 $\gamma^t$ 的发射功率 $p^t$ , 下一时间状态是 $\gamma^{t+1}$ 的概率, 并随用户SIR取值不同, 存在一系列的均衡点, 当任意第 $k$ 个用户信干比 $\gamma_k^* < \gamma_k^{\text{min}}$ 时, 此时马尔可夫完美均衡不存在<sup>[9]</sup>。因此, 选择目标阈值 $\gamma_k^{\text{th}}$ , 保障阈值 $\gamma_k^{\text{min}}$ 作为功率控制的两个均衡点, 根据用户SIR和发射功率自适应调节影响系数 $b_k$ , 以降低噪声和多址干扰影响, 满足用户的QoS需求; CR-NCPCG算法以满足用户SIR需求为前提, 力求降低用户发射功率的消耗, 当任意第 $k$ 个用户输出SIR满足QoS要求时,  $b_k$ 保持初始常量, 否则通过自适应函数 $b_k = \sum_{i \neq k, i=1}^M p_i$ 调节用户输出SIR值, 其中 $b_k$ 达到弱化环境噪声影响和降低多址干扰的效果, 以达到系统新的纳什均衡点, 保证系统状态稳定, 图1为CR-NCPCG迭代算法框图。

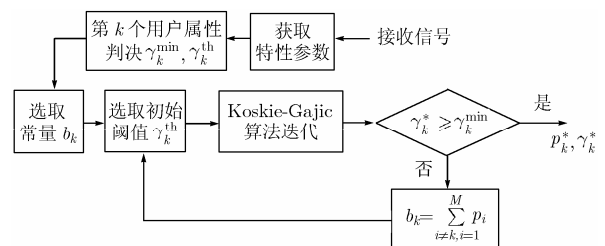


图1 CR-NCPCG 迭代算法框图

### 3.1 CR-NCPCG 算法步骤

以任意用户  $k$  的目标阈值  $\gamma_k^{\text{th}}$  作为 CR-NCPCG 迭代算法初始阈值,  $\gamma_k^{\text{min}}$  为第  $k$  个用户的保障阈值,  $b_k$  初始值为常量, 首先由 Koskie-Gajic 算法计算  $\gamma_k^*$ 。

(1) 当  $\gamma_k^* \geq \gamma_k^{\text{min}}$  时, 则迭代完成, 发射功率  $p_k^*$ , 输出 SIR  $\gamma_k^*$ 。

(2) 当  $\gamma_k^* < \gamma_k^{\text{min}}$  时, 第  $k$  用户环境噪声或多址干扰较强, 调节干扰影响系数  $b_k = \sum_{i \neq k, i=1}^M p_i$ , 请求系统重新求解。

CR-NCPCG 算法考虑非合作功率控制博弈纳什均衡解的存在原理, 以认知无线电环境下的多用户公平共享频谱资源和满足系统不同用户 SIR 为目标, 通过干扰影响系数  $b_k$  自适应调节发射功率和输出 SIR, 降低环境噪声和多址干扰的影响, 提高系统抗干扰能力, 满足不同用户 QoS 需求。

### 3.2 CR-NCPCG 算法的收敛性和纳什均衡存在性

为证明 CR-NCPCG 算法的纳什均衡解存在且收敛一点, 式(7)改写为

$$\mathcal{R}_k(p_k^{(i)}) = p_k^{(i+1)} = \gamma_k^{\text{th}} \frac{p_k^{(i)}}{\gamma_k^{(i)}} - \lambda_k \left( \frac{p_k^{(i)}}{\gamma_k^{(i)}} \right)^2 \quad (8)$$

式中  $\lambda_k = \begin{cases} a_k / \left( 2 \sum_{i \neq k, i=1}^M p_i \right), & b_k = \sum_{i \neq k, i=1}^M p_i \\ \frac{a_k}{2b_k}, & \text{其它} \end{cases}$ , 由隐函数理论知当

式(8)的雅可比矩阵非奇异时存在纳什均衡解。

$$\frac{\partial J_k(p_k, p_{-k}, \lambda_k, \bar{h}_{kk}, \bar{h}_{ki}, \bar{h}_{ki}^2, \nu_k)}{\partial p_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_1}{\partial p_1} & \frac{\partial J_1}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial J_1}{\partial p_M} \\ \frac{\partial J_2}{\partial p_1} & \frac{\partial J_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial J_2}{\partial p_M} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \frac{\partial J_M}{\partial p_1} & \frac{\partial J_M}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial J_M}{\partial p_M} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $\frac{\partial J_k}{\partial p_i} = \frac{\gamma_k^{\text{th}}}{\bar{h}_{kk}} \left[ \bar{h}_{ki} - \frac{2\lambda_k \bar{h}_{ki} I_{k(p-k)}}{\bar{h}_{kk}} - \frac{\partial \lambda_k}{\partial p_i} \frac{I_{k(p-k)}^2}{\bar{h}_{kk}} \right]$ ,  $\frac{\partial \lambda_k}{\partial p_i} =$

$$\begin{cases} \frac{a_k}{2}, & b_k = \sum_{i \neq k, i=1}^M p_i \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

根据  $M$  阶行列式的求解法则, 由于  $\bar{h}_{ki}/\bar{h}_{kk}$  的比值取决于多径链路衰减和多载波数目, 随载波数增加而降低, 实际情况取值很小, 受收敛条件限制  $a_k$  取值一般低于  $10^{-5}$ , 从而保证式(10)的取值主要由主对角线决定, 此时行列式值不为零, 则式(8)的雅可比矩阵非奇异; 因此, CR-NCPCG 算法存在均衡解。当算法  $p^{(i+1)} = \mathcal{R}(p^{(i)})$  有固定解且函数  $\mathcal{R}$  在  $\mathcal{R}(p) > 0$  时满足: (1) 单调性(monotonicity): 若  $p' > p$ , 则  $\mathcal{R}(p') - \mathcal{R}(p) > 0$ ; (2) 可扩展性(scalability): 若  $\forall \alpha > 1$ , 则  $\alpha \mathcal{R}(p) > \mathcal{R}(\alpha p)$  的两个条件, 则算法的收敛解唯一<sup>[10]</sup>。

利用上述条件当满足  $\frac{\nu_k}{2} < I_{k(p-k)} < \frac{\gamma_k^{\text{th}} \bar{h}_{kk}}{2\lambda_k}$  条件时, 已知

条件(1),(2)成立, 此时 CR-NCPCG 算法的纳什均衡点存在且唯一。

## 4 算法仿真及性能分析

仿真从用户 SIR 需求和对用户功率消耗的影响两方面, 通过与经典功率控制算法, Koskie-Gajic 算法, NPCG 功率控制算法<sup>[7]</sup>比较, 以验证本文 CR-NCPCG 算法的性能; 采用相同的噪声环境, 信道为 4 径瑞利信道模型, 各径延迟相差一个码片周期, 径间衰落幅度相差 4dB, 扩频码采用 128 位的 Walsh 码, 载波数为 128, 保护间隔为 5 大于信道最大时延扩展 4, 接收机采用最大比合并准则。不失一般性, 仿真中选择  $\gamma_k^{\text{th}} = 5$ ,  $\gamma_k^{\text{min}} = 3.5$ , 初始功率为  $p_k^{(0)} = 1 \times 10^{-10}$ ,  $\beta_k = 0.25$ ,  $a_k = M \times 10^{-10}$ ,  $M$  为用户数。

经典功率控制算法的迭代公式为<sup>[6]</sup>

$$p_k^{(n+1)} = \gamma_k^{\text{th}} \frac{p_k^{(n)}}{\gamma_k^{(n)}} \quad (10)$$

NPCG 功率控制算法的迭代公式为<sup>[7]</sup>

$$p_k^{(n+1)} = \gamma_k^{\text{min}} \times \frac{p_k^{(n)}}{\gamma_k^{(n)}} + \left( \frac{1}{2\beta_k} \right)^2 \times \frac{\gamma_k^{(n)}}{p_k^{(n)}} \quad (11)$$

图 2 为 CR-NCPCG 算法、Koskie-Gajic 算法、NPCG 算法和经典功率控制 (SIR Balancing) 算法随迭代次数的变化 20 个不同用户输出 SIR 的比较。依图可知, 随环境噪声和多址干扰的改变, 在 Koskie-Gajic 算法中第 3、10 和 17 个用户输出 SIR 低于  $\gamma_k^{\text{min}}$ , 该部分用户的 QoS 需求无法满足, 而认知无线电用户公平共享频谱资源, 公平性是系统稳定的基础, Koskie-Gajic 算法的均衡解无法满足认知用户的公平性需求; 经典的 SIR Balancing 算法将不同用户的 SIR 限定在特定的阈值, 这必然存在功率的浪费问题; NPCG 算法对 SIR 的上限不作限制, 算法的优势在于满足用户的 SIR 需求前提下, 信道性能越好 SIR 值越高, 而 SIR 的提高是以牺牲部分功率为代价; 本文的 CR-NCPCG 算法保留了 Koskie-Gajic 的 SIR 上限限制, 通过自适应函数调节 SIR 的下限阈值, 在 SIR 与功率之间均衡, 既可以确保不同用户输出 SIR 要求, 又降低了用户功率消耗。

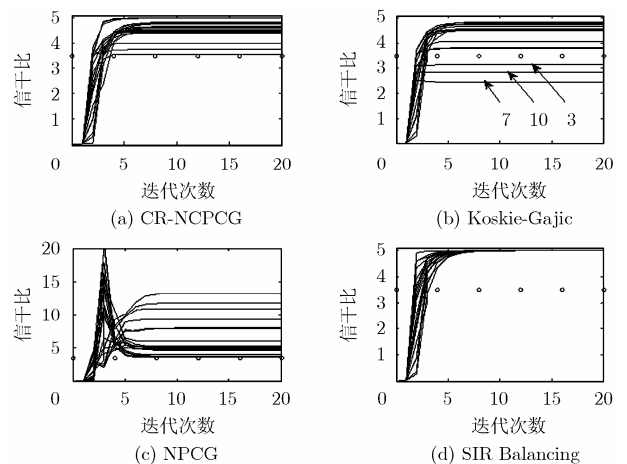


图 2 20 个用户的输出 SIR 比较

图 3 为 4 种算法随迭代次数的变化 20 个用户的输出功率比较, 图中第 3、10 和 17 个用户为克服环境和用户之间干扰的影响, 发射功率远高于其它用户; 与图 2 比较知经典的 SIR Balancing 算法为保持 SIR 恒定值, 而 NPCG 算法保持较高的 SIR, 两种算法的功率消耗明显高于 CR-NCPCG 算法和 Koskie-Gajic 算法; 而 Koskie-Gajic 算法虽然发射功率低于其它算法, 却存在第 3、10 和 17 用户尽管发射功率远高于其他用户, 但 SIR 仍然低于  $\gamma^{\min}$ , 无法满足通信需要, 造成该部分发射功率的浪费, CR-NCPCG 算法则保留了 Koskie-Gajic 算法的低功耗性能, 并通过功率的自适应调节, 满足所用用户 SIR 需求。

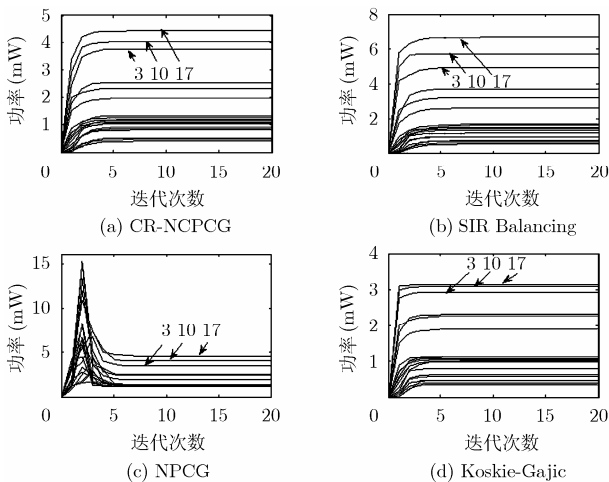


图 3 20 个用户发射功率比较

图 4、图 5 为 CR-NCPCG 算法、Koskie-Gajic 算法、NPCG 算法和 SIR Balancing 算法随用户数目改变的性能比较图, 图中选取 1000 个场景的平均值, 图 4 为 4 种算法平均功率变化性能比较, 图 5 为 4 种算法平均信干比的变化曲线。依图可知, 随用户数目的增加 SIR Balancing 算法因维持恒定 SIR, 功率消耗急剧增加, NPCG 算法在用户较低情况时, 由于对 SIR 上限阈值不加限制, 平均功率的消耗明显高于其它算法, Koskie-Gajic 算法通过控制 SIR 上限阈值, 降低了平均功率消耗, 由上文分析和图 5 可知存在部分用户 SIR 低于保障阈值  $\gamma^{\min}$ , 随用户数目增加愈加明显, 仍然存在功率浪费问题, CR-NCPCG 通过控制 SIR 的上下限阈值, 既保证了用户的最低 SIR 要求, 又有效的降低用户的功率消耗, 实现了不同用户功率的有效控制。

## 5 结论

研究认知无线电环境下的多用户功率控制需满足不同用户输出 SIR 的要求, 降低用户功率的消耗, 实现不同用户公平的共享频谱资源, 为确保系统无线传输链路质量, 本文采用 STBC MC-CDMA 系统, 将 Koskie-Gajic 算法思想应用于认知无线电系统, 保留 Koskie-Gajic 算法的低功率消耗优势, 兼顾认知用户公平共享频谱资源的需求, 通过自适应反馈函数实现用户的 SIR 保障阈值, 设计出一种自适应功率

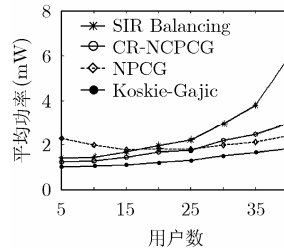


图 4 随用户数目改变平均功率性能比较

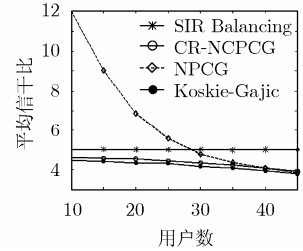


图 5 随用户数目改变平均信干比性能比较

控制算法(CR-NCPCG), 该算法随环境噪声和用户干扰改变自适应调节用户 SIR 和发射功率。仿真结果表明 CR-NCPCG 算法既保证了不同用户输出 SIR 要求, 又有效地降低用户发射功率的消耗, 为认知无线电多用户功率控制应用提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] A PHY/MAC Proposal for IEEE 802.22 WRAN Systems Part2: The Cognitive MAC [S]. [http://www.ieee802.org/22/meeting\\_Documents/2006\\_Mar](http://www.ieee802.org/22/meeting_Documents/2006_Mar).
- [3] Akar, M. Distributed power control for rate-varying multimedia CDMA systems [C]. The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, the Bahamas, 2004, Vol.3: 2854-2858.
- [4] Neel J, Buehrer R M, and Reed B H, *et al.* Game theoretic analysis of a network of Cognitive Radios [C]. The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Tulsa, Oklahoma, 2002, Vol.3: 409-412.
- [5] Neel J O, Reed J H, and Gilles R P. Convergence of cognitive radio networks [C]. Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, 2004, Vol.4: 2250-2255.
- [6] Koskie S and Gajic Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005, 13(5): 1017-1026.
- [7] 程世伦, 杨震, 张晖. 新的认知无线电功率控制博弈算法[J]. *通信学报*, 2007, 28(3): 100-107.
- [8] Chunjun Gao and Haimovich A M. BER analysis of MPSK space-time block codes with differential detection[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(7): 314-316.
- [9] Kuhn H W. *Classics in Game Theory*[M]. Princeton University Press, 1997.
- [10] Chi Wan Sung and Kin-Kwong Leung. A generalized framework for distributed power control in wireless networks [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2005, 51(7): 2625-2635.

程世伦: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为无线通信与网络信号处理。

杨震: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国通信学会常务理事, 江苏省通信学会理事长, 中国教育学会理事, 高教分会副会长, 中国邮电高校学报副主编, 主要研究方向为无线通信与网络信号处理、语音处理与现代语音通信技术、信息安全技术。