

认知无线电系统中一种改进的功率控制博弈算法*

康钰^{1,3}, 朱琦^{1,2}, 鄢广增¹

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 分布式功率控制是认知无线电(CR)系统中的关键技术之一, 它直接影响到无线系统的性能。本文采用了博弈论的方法来实现对CR用户的分布式功率控制, 在David Goodman的非协作博弈算法的基础上, 给出了一种改进的效用函数, 它使各用户在满足要求信干比条件下发送功率最小, 同时使整个系统内由各种干扰引起的失真最小。本文通过理论推导证明了新的效用函数存在纳什均衡, 并且均衡点唯一, 同时仿真验证了该算法的收敛性, 仿真结果表明这种兼顾用户自身利益以及用户间公平性的效用函数能降低发送功率, 并且有效提高CR系统的性能。

关键词: 认知无线电; 功率控制; 博弈论; 效用函数; 公平性

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A

1 引言

随着信息时代的到来, 无线设备被广泛使用, 使得无线频谱成为现代社会不可或缺的宝贵资源。为了提高频谱的利用率, 在各地区内有效的利用空闲频段, 人们提出了认知无线电(CR: Cognitive Radio)^[1,2]技术。CR技术能感知并学习周围无线环境的特征, 通过与通信网络的智能交流, 实时调整传输参数, 以达到通信系统的高可靠性和频谱利用的高效性。一个基本的认知循环要经历3个过程^[3]: 无线传输场景分析、信道状态估计及其容量预测、功率控制和频谱管理。认知无线电系统传输信号时, 需要分析外部的无线传输场景, 因此首先由CR的接收端判断干扰温度的大小、检测出频谱空穴并估计一些传输参数统计量; 然后进行信道状态估计和容量检测, 当这些任务完成后将信息反馈到发送端。基于这些参数, 最后由发送端通过某些策略来实现功率控制和频谱管理, 使CR系统的传输性能达到最佳。本文的研究是针对第三个步骤中发送端的功率控制展开的。

CR系统中发送端的分布式功率控制是一项关键技术, 它直接影响到无线传输系统性能, 如用户间的干扰、系统容量、终端电池使用寿命等。到目前为止, 一般主要应用信息论和博弈论^[4-6], 来解决其功率控制的难题。

分布式功率控制可以被看作是一种分布式的相互作用的目标最大化问题, 即效用最大化, 就如同在博弈论数学模型中, 博弈者在争取最大利润的同时总是尽可能地减少自身的花费。在CR系统中, 博弈算法中的效用函数应该是QoS或信干比(SIR: signal to interference ratio)的函数。2000年Goodman等人提出非合作博弈功控的基本模型^[7], 该模型可以用于CR系统中的分布式功率控制, 它的效用函数与信干比有关。接着他又提出了引入代价的非合作功控博弈的效用函数^[8], 它能够使系统中各用户工作在一个相对较低的发送功率下, 且具有更高的收益, 但是处于均衡状态时, 各用户的信干比是不同的, 距离接收端近的用户具有较高的信干比, 显然这是不公平的。考虑到让链路质量好的用户受到的惩罚多一些, 而让链路质量差的用户少受惩罚, 于是在NPGP的基础上又提出了链路增益代价函数^[9]。

本文的功率控制算法是基于信干比平衡的分布式功率控制, 它在一个非合作博弈^[10,11]的基础上,

* 收稿日期: 2009-04-15 修订日期: 2009-06-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(2007CB310607); 国家自然科学基金(60772062); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(N200813)

综合了迭代功率注水算法中考虑的惩罚机制的代价和信干比公平性代价, 对效用函数进行了改进。这种博弈实质是用户在追求自身利益最大化的自私竞争, 同时考虑了其它用户对本用户的影响的均衡协调过程。各用户在满足某可调信干比条件下传输功率最小要求的同时, 还要做到使整个系统内由各种干扰引起的失真最小。本文通过理论推导证明了改进的效用函数存在纳什均衡, 并且均衡点唯一, 同时仿真验证了该算法的收敛性, 仿真结果表明这种兼顾用户自身利益以及用户间公平性的效用函数能降低发送功率, 并且有效提高 CR 系统的性能。

本文安排如下, 第2部分给出了博弈模型及改进的效用函数; 第3部分对纳什均衡的存在进行了证明; 第4部分对系统进行了仿真, 并对仿真结果进行了分析; 第五部分是论文的总结。

2 博弈论模型及改进的效用函数

D. Goodman 等人提出了非合作博弈功控的基本模型 NPG(non-cooperative power control game)^[7], 在一个无线 CR 系统里, 设有 N 个用户, 每个用户的分组长度固定为 M 比特, 其中所包含的有用信息为 L 比特 ($L < M$), 传输速率固定为 R (b/s), 发送功率为 p , 则用户 i 的效用函数为:

$$u_i = \frac{LRf(\gamma_i)}{Mp_i} = \frac{T_i}{p_i} \quad (1)$$

其中: γ_i 表示用户 i 的信干比, T_i 为吞吐量。

在 AWGN 信道下, 对于非相关 FSK, $f(\gamma_i) = (1 - e^{-0.5\gamma_i})^M$, 则可以得到效用函数为^[7]:

$$u_i = \frac{LR}{Mp_i} (1 - e^{-0.5\gamma_i})^M \quad (2)$$

$$\gamma_i = G \frac{h_i p_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2} \quad (3)$$

式中 G 表示增益, h_i 表示第 i 个用户的路径增益, σ^2 是背景噪声功率。

在非合作博弈功率控制算法中, 各个用户仅仅知道“本地信息”, 其对功率的调整是为自己可以获得最大的效用, 也就是一个“自私”争夺的过程。而任何一个用户增大发送功率会使其它用户的效用降低(在其它用户的发送功率不变的情况下), 这样受到影响的用户也通过增大发送功率来提高自己的效用, 于是最终的平衡点是处在一组各个分量比较大的功率向量上。为了促使各个用户以较低的发送功率进行通信, 引入了价格机制。因为一个用户发送功率的增加将抑制其它用户的效用, 所以对每个用户的发送功率定义价格函数, 并在这些因素之间寻找一个平衡点。

于是 D. Goodman 等人又提出增加了代价的非合作功控博弈 NPGP (non-cooperative power control game via pricing)^[11]的效用函数:

$$u_i^c = \frac{LR}{Mp_i} f(\gamma_i) - cp_i \quad (4)$$

式中定义的代价函数为 cp_i , 其中 c 是一个常量, 称为静态代价因子。

NPGP 能够使系统中各用户稳定地工作在一个相对较低的发送功率下, 且具有更高的收益。但是处于均衡状态时, 各用户的信干比和接收功率是不同的, 距离基站近的用户具有较高的信干比和接收功率, 显然这是不公平的。

考虑到让链路质量好的用户受到的惩罚多一些, 而让链路质量差的用户少受惩罚。于是, 在 NPGP 的基础上提出链路增益代价函数的博弈模型 NPGPpg (non-cooperative power control game via path gain pricing)^[9]的效用函数:

$$u_i^{pg} = \frac{LR}{Mp_i} f(\gamma_i) - \theta h_i p_i \quad (5)$$

上式中, θ 是比例系数, 为实常量, 它与用户链路增益及功率三者的乘积就是用户所要付出的链路增益代价函数。通常它与用户链路增益 h_i 的乘积构成的代价因子要大于1, 否则各用户的代价会很小, 相当于没有代价。

本文基于用户接收功率和信干比来定义用户的代价函数,同时考虑到代价函数必须是非负的凸函数^[4],存在一个正的最小值,最后定义如下函数作为用户 i 的代价函数,即综合代价函数 (synthetic pricing):

$$J_i^{\text{syn}}(p_i, \gamma_i) = \theta h_i p_i + \alpha (\gamma^{\text{tar}} - \gamma_i)^2 \quad (6)$$

其中 α 是比例系数,为实常量,可以得到 NPGJsyn 博弈模型的效用函数如下:

$$u_i^{J_{\text{syn}}} = \frac{LR}{Mp_i} f(\gamma_i) - \theta h_i p_i - \alpha (\gamma^{\text{tar}} - \gamma_i)^2 \quad (7)$$

NPGJsyn (non-cooperative power control game via synthetical pricing)。

式 (7) 的前两项是 BSI Game; 第三项是 Self-motivated Game, 则总效用函数可用如下方法表示:

$$V = V_s + V_{\text{BSI}} = \sum_{i=1}^N -\theta h_i p_i + \sum_{i \in N} \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ \frac{LR}{Mp_i} \left(1 - e^{-0.5 \frac{h_i p_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2}} \right)^M - \alpha \left(\gamma^{\text{tar}} - \frac{h_i p_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

由公式 (7) 可知信干比的平衡要求通过最小均方误差准则作为衡量的标准。该效用函数中因目标信干比误差平方项的加入,能够保证博弈达到均衡时,信干比维持在同等水平,这个相同的信干比水平就是目标信干比。基于这个效用函数博弈的结果是使各用户尽量得到相同的服务质量。这样抑制了发送功率因个体利益最大化的极端目标而不断增大的趋势,进一步减小发送功率,从而改变单纯追求“自私”的自我利益最大化的目标。考虑其它用户发送功率等级策略对自己的影响,并在这两种目标中均衡地实现相互影响和相互促进,通过不断迭代功率,实现各个用户发送功率值的改善。改进的效用函数除了能够实现功率控制的基本目的外,还可以增加系统在信干比指标上的可控性,即可以参考主观的因素(如用户需求等服务质量的要求)来设置系统的目标信干比,从而有效调节系统实际的信干比水平。

3 超模性证明

根据博弈论定理,如果策略空间 $S_i = R^{m_i}$, 且如果 u_i 对于 s_i 是二阶连续可微的,则 u_i 对于 s_i 是超模的,当且仅当,对于 s_i 的任何两个分量 s_{ik} 和 s_{il} ($k=l$), 都有 $\partial^2 u_i / \partial u_{ik} \partial u_{il} \geq 0$ ^[4]。对于本模型

$$u_i^{J_{\text{syn}}} = \frac{LR}{Mp_i} f(\gamma_i) - \theta h_i p_i - \alpha (\gamma^{\text{tar}} - \gamma_i)^2 \quad (9)$$

其中, $f(\gamma_i) = (1 - e^{-0.5 \gamma_i})^M$, $\gamma_i = G \frac{h_i p_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2}$ 。

首先,将第一部分 $\mu_i = \frac{LR}{Mp_i} f(\gamma_i)$ 对 p_i 求偏导数,则:

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = \frac{LR}{Mp_i^2} \left(\gamma_i \frac{df(\gamma_i)}{d\gamma_i} - f(\gamma_i) \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{LR}{Mp_i^2} \frac{\partial \gamma_i}{\partial p_j} \frac{\partial^2 f(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \quad (11)$$

$$\text{其中: } \frac{\partial^2 f(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} = \frac{M(M-1)}{4} e^{-\gamma_i} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_i}{2}} \right)^{M-2} - \frac{M}{4} e^{-\frac{\gamma_i}{2}} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_i}{2}} \right)^{M-1} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \gamma_i}{\partial p_i} = -G \frac{p_i h_i h_j}{\left(\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2 \right)^2} < 0 \quad (13)$$

则 (12) 式可得出,当 $\gamma \geq 2 \ln M$ 时, $\frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \leq 0$, 而且 $\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0$ 。

综上所述,收益 u_i 在功率向量 (即策略集) (p_i, p_{-i}) 上具有递增差异,即 u_i 在 p_i 上是超模的。

设(7)式中的第二项(即 $-\theta h_i p_i$)为 A , 将 A 对 p_i 求一阶导数, 可得: $\frac{dA}{dp_i} = -\theta h_i$, 再将此结果对 $\forall p_i, (j \neq i)$ 继续求二阶混合偏导数, 由于对常数求导结果为0, 所以 $-\theta h_i p_i$ 这一项不影响最终结果。

设(7)式中的第三项(即 $(\gamma^{tar} - \gamma_i)^2$)为 B , 将 B 对 p_i 求一阶导数, 可得:

$$B = (\gamma^{tar})^2 - 2\gamma^{tar}\gamma_i + \gamma_i^2 \quad (14)$$

由于 B 中的第一项为常数, 求导后为0, 它不影响最终结果。所以, 这里记:

$$C = -2\gamma^{tar}\gamma_i + \gamma_i^2 = \frac{-2\gamma^{tar}h_i p_i(\sum h_j p_j + \sigma^2) + h_i^2 p_i^2}{(\sum h_j p_j + \sigma^2)^2}$$

则有

$$\frac{\partial C}{\partial p_i} = \frac{-2\gamma^{tar}h_i(\sum h_j p_j + \sigma^2) + 2h_i^2 p_i}{(\sum h_j p_j + \sigma^2)^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{h_i h_j [2\gamma^{tar}(\sum h_j p_j + \sigma^2) - 4h_i p_i]}{(\sum h_j p_j + \sigma^2)^3} \quad (16)$$

由于 γ^{tar} 一般为 $1/N$ (噪声对 N 个用户总接收功率的影响忽略不计), $\sum h_i p_i + \sigma^2 \approx N h_i p_i$, 所以可以认为(16)式为负, 即 $\frac{\partial^2 C}{\partial p_i \partial p_j} \leq 0$ 。

结合(16)、(14)式, 以及上面得到的结论, (9)式中的代价函数部分, 也即本文采用的综合代价函数满足超模的定义。

根据博弈论, 一切超模博弈都存在唯一的纳什均衡^[4], 所以本模型存在唯一效用最大取值点。

4 仿真与性能分析

本文假设在某一区域 CR 用户已经检测到频谱空穴, 并已经被允许接入, 各 CR 用户都以追求利益最大化为目的, 建立非合作超模博弈的模型, 并进行代价函数和效用函数的设计和优化。本模型还考虑到这些用户中的其他用户对本用户的通信质量的影响, 因而又不是单纯的“自私”的竞争过程。通过对“自私”和接受其他用户的影响之间的协调, 作用到效用函数上来, 这样优化求解的发送功率和效用值更加能够体现公平性, 同时也实现了功率控制的目标。

在本文的仿真中, 采用了类似于文献[9]中的功率更新算法, 来计算代价效用函数的纳什均衡, 具体迭代过程如下:

步骤 1. 设定初始功率矢量 $\mathbf{p}(k)$, 精度 $\varepsilon > 0$, 初始时刻 $k = 0$;

步骤 2. 令 $k = k + 1$, 计算功率 $\mathbf{p}(k)$;

步骤 3. 如果对所有 j , $|p_i(k) - p_i(k-1)| > \varepsilon$, 返回步骤 2; 否则, $\mathbf{p}(k)$ 即为最终功率解^[9]。

仿真系统的模型为 CDMA 认知无线系统, 每个用户的分组长度和其传输速率都是固定的, 无前向纠错编码(forward error correction coding), 采用非相关频移键控(non-coherent FSK), 信道假设为静态的, 即链路增益为确定函数。本文的参数说明参见表 1。

其中各用户距基站的距离单位为米, 数值为 $d = (460, 580, 690, 810, 920, 1080)$ 。

表 1 仿真参数

参数名	数值
为每帧总比特数 (b)	40
L 为每帧所含的信息比特数 (b)	32
W 为扩频带宽 (Hz)	10^6
R 为比特速率 (bps)	10^4
G 为处理增益 W/R	100
p_e 误码率	$0.5\exp(-\gamma/2)$
σ^2 为接收噪声功率 (W)	5×10^{-15}
N 为用户数量	6
C 为代价因子	40000
α	4000
θ	10^{-12}
h_i 为用户 i 的链路增益	$h_i = 0.097/d_i^2$
γ^{tar} 为目标信干比	18.3

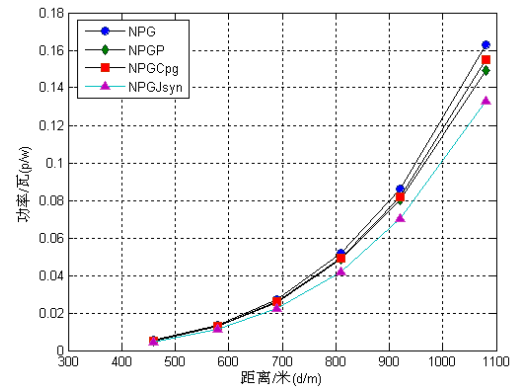


图 1 各用户发送功率比较图

本文分别对 NPG、NPGP、NPGPpg 和 NPGJsyn 四种博弈模型进行了仿真，结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出，达到平衡时，NPG 的发送功率最大，NPGCpg、NPGP 次之，NPGJsyn 的发送功率最小，且随着距离的增加各种方式的发送功率之间的差距逐渐增大，即发送功率随距离增大降低的效果更明显。据此可以得出结论，NPGCpg、NPGP 相对于 NPG 在发送功率方面都有一定程度的改善，而本文提出的 NPGJsyn 模型又对 NPGCpg、NPGP 加以改进，体现了算法的优越性。

另外，由此图还可以看出，本文采用的博弈算法是对每个用户单独追求自身利益最大化的进一步协调，因为加入了其它用户接收功率对本用户通信质量的影响，即信干比的限制，使得本文算法进一步摒除了通过增大发送功率来增大效用的方法。所以，本算法进一步保证了服务质量，增强了系统可靠性。

从图 2 以看出，达到平衡时，NPGJsyn 模型下的效用最大，尤其从距离最近的用户上表现得最明显，而 NPGCpg、NPGP、NPG 三种博弈模型的效用依次呈现递减的状态。随着距离的增大，四种博弈模型的效用表现出递减的趋势，它们之间的差距在逐渐缩小，但 NPGJsyn 相比于其它三种的效用仍然具有绝对的优势。另一方面，从后面的叙述中也可以得知，NPGJsyn 的相对增长百分比也是具有很强优势的。

结合前面的图形可以看出，NPGJsyn 的效用的增大，依赖于其发送功率的减小，这样使得每单位发送功率做出的吞吐量贡献更大，从而增大了效用。

为了能将四种博弈模型下各参量的比较有更清晰的对比，这里将达到平衡时的结果用表的方式列写于下：（见表 2）。

由表 2 可以看出，达到纳什均衡时，四种模式的发送功率的下降幅度很明显，虽然 NPGJsyn 总体信干比较另外三种模型有所下降，但综合比较

NPG、NPGCpg、NPGJsyn 三种博弈模型下得到的信干比均在 18 附近浮动，相差不多；吞吐量的差距更是微乎其微，最终从总效用的比较上看 NPGJsyn 的效用具有非常明显的提高，于是可以得出如下结论：NPGJsyn 在四种博弈管控模型中，其算法得到了最优化，在信干比公平性、服务质量和系统可靠性的要求，以及吞吐量的减少量几乎为零的条件下，发送功率得到了最大限度的减小，效用得到了最大限度的增加，体现了算法的优越性。

将表 2 中的数据以 NPG 算法为参照，其它三种方法的各参量变化情况如表 3 所示。

由表 3 可以看出，达到平衡时，各种博弈模型的信干比都有微小的下降，下降的幅度尤其在 NPGP 中最明显，因此 NPGP 是最不公平的。在 NPG、NPGCpg 中信干比下降得相对较缓慢，而在 NPGJsyn 中下降最缓慢，所以 NPGJsyn 是最公平的。各用户的吞吐量在 NPG、NPGP、NPGCpg、NPGJsyn 中依次递减，在 NPGP 中减小相对较明显，但减少的幅度不大，且四种博弈模型下的吞吐量之间的差别也不大，而吞吐量的相对减少百分比也微乎其微。由此可以说明，四种博弈模型之间的吞吐量微小差别不会影响服务质量，也即，如果发送功率的减少幅度很明显、效用增长幅度很大，则这样的算法就

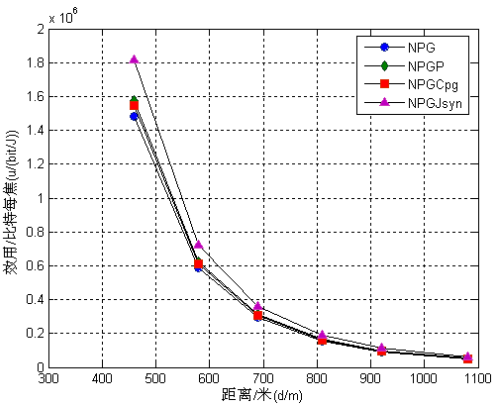


图 2 各用户效用比较图

表 2 四种博弈模型数据比较

博弈管控模型	总发送功率 (W)	平均信干比	总吞吐量 (b/s)	总效用 (b/J)
NPG	0.3466	18.4156	47808.0	2.6624*10 ⁶
NPGP	0.3212	18.3174	47796.6	2.8262*10 ⁶
NPGCpg	0.3302	18.3430	46801.2	2.7727*10 ⁶
NPGJsyn	0.2830	18.0932	47774.4	3.2589*10 ⁶

表 3 四种博弈模型增量比较（百分比）

博弈管控模型 (以 NPG 为基准)	总发送功率 减少百分比	平均信干比 减少百分比	总吞吐量 减小百分比	总效用增 加百分比
NPG	0	0	0	0
NPGP	0.0733	0.0146	0.00024	0.0615
NPGCpg	0.0473	0.0039	0.02106	0.0414
NPGJsyn	0.1835	0.0175	0.00070	0.1830

是优化了的算法, 吞吐量轻微的减小并不影响最终算法的优劣程度。平衡时, 在信干比和吞吐量只有轻微减小的让步下, 发送功率可以得到较多的减幅, 且总效用可以得到更大幅度的提高。这与从上表中得到的分析中结论一致。也就是说, NPGJsyn 可以在保证用户的服务质量 (QoS) 的前提下, 使发送功率大为减少, 且总效用, 即功率利用率大幅度的提高。也就是说, 当与 NPG、NPGP、NPGPpg 具有相近用户质量要求时, NPGJsyn 的效用优势更加突出, 是对功率控制的目标更进一步的实现。

由于本模型的效用函数中存在目标信干比 γ^{tar} 这个可变的参数, 下面是对目标信干比分别取 17, 18.3, 19 三个值时的仿真分析。

图 3 可以看出, 随着目标信干比的增大, 发送功率也在增加, 而且增长幅度随距离的增大而增加。由于目标信干比的增加, 使得均衡时的信干比因趋于目标值而增加, 这样必然导致每个用户都通过增加各自的发送功率来抵抗噪声的干扰, 即导致了发送功率的增加。

图 4 是信干比较图, 由图 4 可以看出目标信干比高的, 实际系统信干比也高, 可以通过设置目标信干比的方法对系统所提供的服务质量进行控制, 但是实际系统的信干比都略低于目标信干比, 目标信干比越大, 实际信干比偏离得越多。

图 5 是吞吐量比较图, 由图 5 可以看出, 目标信干比增加时, 系统的吞吐量也随之增加。这是因为目标信干比的增加, 导致了实际系统信干比的增加, 进而误码率减小, 正确传输码组的概率增加, 因此系统正确接收的有效信息速率就增加, 也即吞吐量增大。

图 6 是效用比较图, 由图 6 可以看出, 随着目标信干比的增加, 效用在逐渐减小。这是因为效用是发送功率的减函数。由于信干比的提高, 必须要求增加用户发送功率来抑制噪声的干扰, 这就使得效用随发送功率的增大而减小。

通过前面的分析不难得出, 每个用户能够在降低发送功率的过程中, 平衡信干比因素, 使各个用户的信干比维持在同等水平, 从而可以均衡地维持甚至提高信干比, 即每个用户都趋于少受其他用户的干扰, 保证了通信质量。另一方面, 由于效用是发送功率的单调减函数, 即发送功率的减小能够导致效用的增大, 这样迭代下去, 会再次使发送功率减小, 信干比提高, 效用增大, 如此形成良性循环。

5 结论

本文采用了 Goodman 的博弈功控模型, 并使各个用户在单纯追求自身效用最大化和接受其它用户接受功率大小对本用户的影响两者之间协调, 通过迭代更新发送功率的值, 从而达到新的均衡。仿真结果表明, 新的博弈功控模型达到均衡后, 用户的传输功率较采用传统功率控

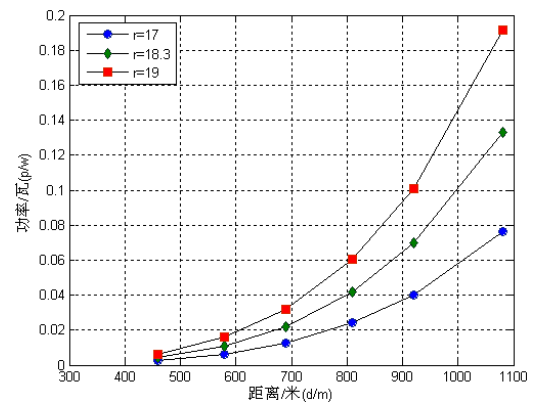


图 3 不同目标信干比下发送功率比较图

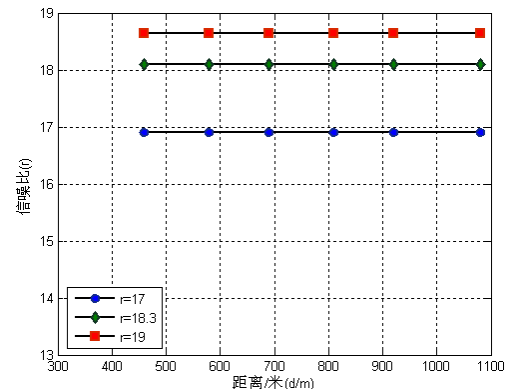


图 4 目标信干比不同取值下的信干比较图

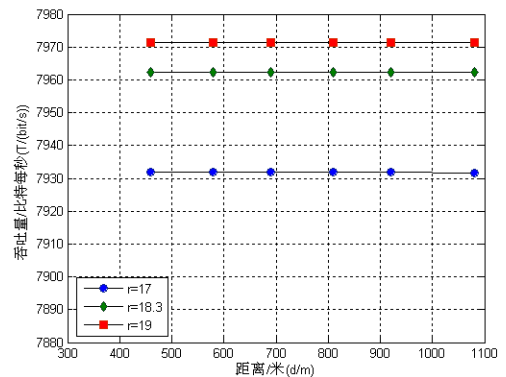


图 5 目标信干比不同取值下的吞吐量比较图

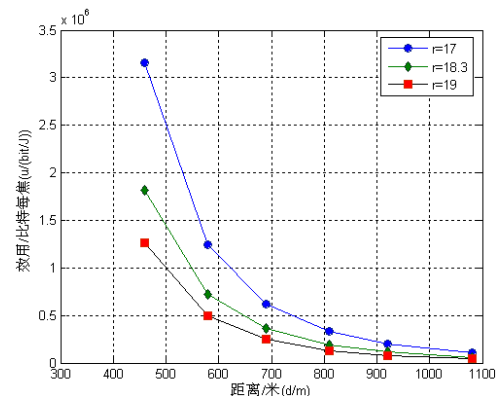


图 6 不同目标信干比下效用比较图

制算法有明显的减少, 这对于干扰受限的系统有利于其系统容量的提高, 同时单位功率的利用效率得到很大提高。另外, 低发送功率可以有效降低移动终端对人体的辐射, 所以也非常有利于人体的健康。功率控制效果较采用传统的基于博弈论的功率控制算法有一定程度的改善。由于本文改进的效用函数可以通过参数的调整来增加系统信干比的可控性, 因此对于需要主观设置与信干比相关的系统性能的场景, 本文具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] I F Akyildiz. Next generation/ dynamic spectrum access/ cognitive radio wireless networks: A survey [J]. **Computer Networks**, 2006, 50: 2127-2159.
- [2] F K Jondral. Cognitive Radio: A Communications Engineering View [J]. **IEEE Wireless Communications**, 2007, 14(4): 28-33.
- [3] Simon Haykin. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications [J]. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 2005, 23(2): 201-220.
- [4] [美]朱·弗登博格, [法]让·梯若尔, 博弈论, 黄涛, 郭凯, 等译. 北京: 中国人民大学出版社, 2002: 1-28; 419-434.
- [5] Wei Wang, Yilin Cui, Tao Peng, Wenbo Wang. Noncooperative Power Control Game with Exponential Pricing for Cognitive Radio Network [A]. **Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th [C]**. 2007-04. 3125-3129.
- [6] Xing Y, Chandramouli R. Stochastic Learning Solution for Distributed Discrete Power Control Game in Wireless Data Networks [J]. **Networking, IEEE/ACM Transactions on**, 2008, 16(4): 932-944.
- [7] David Goodman. Power Control for Wireless Data [J]. **IEEE Personal Communications**, 2000. 48-54.
- [8] C Saraydar, N B Mandayam, D J Goodman. Efficient Power Control via Pricing in wireless Data Networks [J]. **IEEE Trans. Comm.**, 2002, 50(2): 291-303.
- [9] 钟卫, 徐友云, 蔡跃明. 非合作功率控制博弈优化设计[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 108-113.
- [10] 殷志明, 谢剑英. 无线数据网络中基于博弈论方法的功率控制[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(6): 909-915.
- [11] 姚欣, 曹敏, 冯仿, 等. 无线 CDMA 数据网络中功率控制的非合作博弈方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(3): 373-376.

作者简介: 康钰 (1984-), 女, 硕士生, 目前主要研究方向为下一代移动通信系统的无线资源管理; 朱琦 (1965-), 女, 教授, 主要研究方向为无线通信中的调制编码技术、认知无线电技术及无线资源管理等; 酆广增 (1943-), 男, 教授。主要研究方向为数字移动通信与通信信号处理。

An improved power control game in cognitive radio system

KANG Yu^{1,3}, ZHU Qi^{1,2}, FENG Guang-zeng¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Distributed power control is one of the key techniques in cognitive radio system, since it directly affect the performance of wireless system. The transmit-power control problems in a cognitive-radio environment (involving multiple users) may be viewed as a game-theoretic problem. Based on the non-cooperative power control game, which is created by David Goodman, an improved utility function is given. This function can minimize the average transmit-power and interference under the condition of satisfying a required SIR. It is proved that the Nash Equilibrium is existed and unique for the improved game. Meanwhile, the simulation also certificates the convergence of the new algorithm. Simulation results show that the new algorithm which gives attention to the balance between efficiency and fairness can reduce transmission power efficiently and the performance of cognitive radio system is improved significantly.

Key words: cognitive radio; power control; game theory; utility function; fairness