doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2015176

基于博弈论功率控制的串行干扰消除算法

胡松华[1,2]，张建军[1]，陆阳[1]，刘斌[1]，韩江洪[1]
(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院，安徽 合肥 230009；
2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院，河南 焦作 454000)

摘 要：无线网络实现串行干扰消除算法可以提高网络吞吐量，在采用串行干扰消除算法的无线网络系统中，如何控制节点间传输功率使系统效用最大化是一个 NP-Hard 难题。针对此问题提出非合作博弈算法来解决节点间的传输功率控制，提出了串行干扰消除算法功率控制的非合作博弈，证明了纳什均衡，所提算法可以获得较高的无线网络吞吐量，仿真实验证实了分析结果并展示了算法的优越性。
关键词：无线网络；功率控制；非合作博弈论；串行干扰消除
中图分类号：TN92 **文献标识码**：A

Power control for successive interference cancellation algorithm based on game theory

HU Song-hua[1,2], ZHANG Jian-jun[1], LU Yang[1],LIU Bin[1], HAN Jiang-hong[1]
(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: It was proved that implementation of successive interference cancellation could improve network throughput in wireless networks, while in order to maximize network throughput, it was a NP-Hard problem that how to control transmission power when successive interference cancellation was used in wireless networks. A non-cooperative game theory is proposed to solve power control between wireless nodes for successive interference cancellation, in which non-cooperative game theory model is proposed and Nash equilibrium is analyzed, and also the proposed algorithm can obtain good network throughput than others, simulations validate the results and demonstrate the superiority of the algorithm.
Key words: wireless networks; power control; non-cooperative game theory; successive interference cancellation

1 引言

串行干扰消除(SIC, successive interference cancellation)是多用户检测技术(MUD, multi-user detection)的一种次最佳算法，具有计算复杂度低、实现简单，在理论和实现方面得到广泛的研究[1,2]。近年来，SIC 算法研究的热点是合理调整无线节点的传输功率，使接收节点的信号与噪声干扰和之比 SINR(signal-to-interference-plus-noise-ratio) 达到最优，节约无线网络系统节点能耗和提高网络吞吐量[3,4]。文献[3]研究了在 CDMA 网络，各无线节点不同的 QoS 指标排序情况下 SIC 的功率控制。文献[4]讨论了在 CDMA 网络，SIC 最优传输功率控制和解码顺序问题，文献[3,4]指出基于多用户检测 SIC 功率控制的无线网络吞吐量是一个 NP-Hard 问题。文献[5]研究了在 ad hoc 网络实现 SIC 算法的资源调度，提出了并发图方法来解决 SIC 的解码效率，网络吞吐量提高了 80%。文献[6]研究了在无线网络，推导出 SIC 信道增益的调整和并行干扰消除(PIC, parallel interference cancellation)优化链路的激活也是 NP-Hard 问题，并提出采用整数线性规划的方法达到全局最优。文献[7]研究了在多输入单输出的下

收稿日期：2014-09-19；**修回日期**：2015-01-23
基金项目：国家自然科学基金资助项目（61370088）；教育部博士点基金资助项目（20100111110004）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61370088);Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20100111110004)

行链路，联合用户调度和跨区域自适应干扰消除的方法降低复杂度和提高网络吞吐量。而近几年来，在无线网络中引入博弈论(game theory)来进行无线节点资源竞争分配和调度越来越受到科研人员关注[8~12]。文献[8]是博弈论在无线传感器网络应用的综述性文章，总结了博弈论在无线传感器网络的应用领域，包括路由协议设计、拓扑控制、功率控制、能耗节约、转发数据分组、数据收集、频谱分配、带宽分配、QoS 控制和覆盖优化等。文献[9,10]讨论了在无线 CDMA 网络的码同步阶段，采用非合作博弈论进行资源配置的方法，获得了较好的同步性能和节约能耗。文献[11]研究了在认知无线电网络中提出的一种基于信号博弈的分布式功率控制算法，通过信号博弈策略依次选择功率控制策略，达到信道信息共享，能有效避免对主用户信号的干扰以及竞争次用户之间功率冲突，系统吞吐量得到明显提高。文献[12]研究了针对认知无线电网络的特殊块衰落信道，应用非合作博弈论进行信道选择，减小用户间的干扰，提高网络吞吐量。国内文献方面，文献[13,14]的研究涉及了 SIC 降低复杂度的方法，但没有应用非合作博弈论对 SIC 的功率进行控制。文献[13]的研究了分层空时架构中 SIC 迫零检测复杂度较高的问题，提出了一种低复杂度快速递归算法。文献[14]研究了在 SIC 的 DS-CDMA 系统中，采用速率控制与译码顺序调整的联合优化提出 2 种次优贪婪算法，提出的算法具有较低的计算复杂度，可用于速率的快速有效配置。

综合已有文献分析，文献[3,4]研究的 SIC 功率控制方法采用的是传统的数学工具，未采用智能控制的方法。文献[5,6]研究了无线网络节点间的资源调度，未涉及到 SIC 的功率控制。文献[8~12]研究了非合作博弈论在无线网络中的应用，但在无线网络应用非合作博弈论实现 SIC 的功率控制还未有相关文献。国内文献[13,14]的研究集中在降低 SIC 算法的计算复杂度，也未涉及 SIC 算法的功率控制。故本文应用非合作博弈论对 SIC 的实现进行功率控制。本文首先提出了在基站实现 SIC 提高网络吞吐量的系统模型，得出对节点进行功率控制是一个 NP-Hard 问题，然后应用非合作博弈论来解决节点功率控制，将问题转化为非合作博弈论来解决，并证明了纳什均衡的存在性和唯一性。

2 系统模型

不失一般性，设无线网络采用分时传输方案，调度周期时间段为 T ,等分为 n 个时间片，则每个节点占用时间片 $t=\frac{T}{n}$ 。在无线网络的物理模型中，设区域内无线节点为 N ，当任一无线节点 i 向基站 j 发送数据，且被 j 成功接收，则节点 i 在基站 j 处的信号与干扰加噪声比（SINR, signal to interference plus noise ratio）可表示为

$$\gamma_{ij}=\frac{p_{ij}}{\sigma^2+\sum_{k\in N}^{k\neq i}p_{kj}},i,k\in N,j\in \Gamma_j \tag{1}$$

其中，γ_{ij} 为 i 在 j 处的 SINR，p_{ij} 为节点 i 在 j 处接收功率，σ^2 为噪声功率，$\Gamma=\sum_{j=1}^{M}\Gamma_j$ 为基站集合。

若 $\gamma_{ij}\geqslant\beta$ ，β 为 SINR 门限值，则节点 i 到基站 j 传输数据成功，则获得的信道传输速率为

$$c_{ij}=W\,\mathrm{lb}(1+\gamma_{ij}),i\in N,j\in \Gamma_j \tag{2}$$

其中，W 为信号带宽，c_{ij} 为 i 到 j 数据传输速率。

本文在基站接收端 j 采用 SIC 算法，接收端 j 可成功接收并解码发送端 i 发送的数据。SIC 的工作原理如下：如图 1 所示，假设 N 个发送端的在接收端 j 的接收功率大小为 $p_{1j}\leqslant p_{2j}\cdots\leqslant p_{Nj}$ ，则只要满足以下条件

$$\begin{cases}\text{step1} & \dfrac{p_{Nj}}{\sum_{k=1}^{k=N-1}p_{kj}+\sigma^2}\geqslant\beta\\ \text{step2} & \dfrac{p_{(N-1)j}}{\sum_{k=1}^{k=N-2}p_{kj}+\sigma^2}\geqslant\beta\\ \vdots & \vdots\\ \text{step}(N-i+1) & \dfrac{p_{ij}}{\sum_{k=1}^{k=i-1}p_{kj}+\sigma^2}\geqslant\beta\end{cases} \tag{3}$$

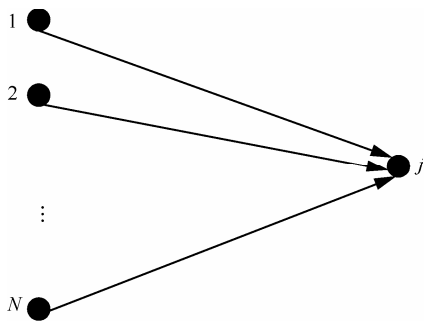

图 1 多个发送节点一个接收节点

则接收端节点 j 从 N 个发送端解码数据分组的顺序为 $N,N-1,N-2,\cdots,2,1$，如式(3)所示，为了解码接收功率 p_{ij} ,SIC 首先解码最强信号功率，然后将解码出来的最强功率信号从接收端信号中消除掉，从余下的功率信号中再解码次强的信号功率（解码前的功率排序），再将次强的功率信号从接收端信号中消除掉，以此推之，直至余下的接收端功率信号不满足条件为止。

参照文献[14]，设在解码节点 i 的信号之前，节点1到节点 $i-1$ 的信号已经成功解码，则基站 j 的干扰噪声和可表示为

$$\sigma_i^2=\sum_{k=1}^{i-1}\theta g_k p_k+\sum_{k=i+1}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W \tag{4}$$

其中，θ 为 SIC 不完全解码系数，表示不完全解码时残余信号对后续干扰消除的影响，$0\leqslant\theta\leqslant1$,当 $\theta=0$ 时，表示完全解码，即每次解码后无残余信号，当 $\theta=1$ 时，表示单分组接收。g_k 为信道增益，p_k 为传输功率，W 为带宽，σ_0^2 为噪声的功率谱密度。则节点 i 在 j 的 SINR 为

$$\gamma_i=\frac{Wg_i}{\sum_{k=1}^{i-1}\theta_k g_k p_k+\sum_{k=i+1}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W}\frac{p_i}{r_i} \tag{5}$$

其中，p_i 为节点 i 的传输功率，g_i 为 i 到 j 的信道增益，r_i 为 i 到 j 的传输速率，则节点 i 传输功率递推式为

$$\begin{aligned}&p_i=\frac{r_i\gamma_i}{Wg_i}\left(\sum_{k=1}^{i-1}\theta_k g_k p_k+\sum_{k=i+1}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W\right),i=2,\cdots,N\\&p_1=\frac{r_1\gamma_1}{Wg_1}\left(\sum_{k=2}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W\right)\end{aligned} \tag{6}$$

定义一个二进制调度变量 $x_{ij}[t]$ 表示节点 i 到节点 j 在时隙 $t(1\leqslant t\leqslant T)$ 的链路，则

$$x_{ij}[t]=\begin{cases}1, & \text{在时隙}t\text{节点}i\text{成功发送数据到节点}j\\0, & \text{不成功}\end{cases}$$

Γ_i 为节点 i 的相邻节点集合，对单播通信而言，在一个时隙 t 时间内，对发送端 i，只有一个节点传输数据，故

$$\sum_{j\in\Gamma_j} x_{ij}[t]\leqslant1,i\in N,1\leqslant t\leqslant T \tag{7}$$

对接收端 j，由于采用了 SIC 算法，则 $\sum_{\substack{i\in N,\\ j\in\Gamma_j}} x_{ij}[t]>1$。

文献[15]给出了 SIC 算法接收端 j 成功译码的信号个数的上限为 A_j

$$A_j=1+\log_{(\beta+1)}\left(\frac{p_j^{\max}}{\beta\sigma^2}\right) \tag{8}$$

其中，$p_j^{\max}=p_{\max}$，对式(8)进行简单变换，则在 SIC 算法下，节点接收功率 p_{ij} 须满足

$$p_{ij}\geqslant\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1} \tag{9}$$

3　基于博弈论功率控制的 SIC 算法

3.1　算法推导

在 SIC 方案下，为最大化端到端网络吞吐量，可得满足 SIC 算法的节点 j 处接收功率的选择范围为

$$p_{ij}\in[\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1},p_{\max}],i\in N,j\in\Gamma_j \tag{10}$$

节点 i 的接收功率计算公式为 $p_{ij}=g_{ij}p_{t_ij}$，g_{ij} 为节点 i 到节点 j 的链路信道增益，$g_{ij}=a(d_{ij})^{-\alpha}$，$d_{ij}$ 为节点 i 到节点 j 的距离，α 为衰减指数，一般取 $2\sim6$，并且为描述方便，令 $\gamma_i=\gamma_{ij}$，$g_i=g_{ij}$，$p_i=p_{t_ij}$，$x_i=x_{ij}$，因此，要想获得最大吞吐量网络性能,讨论的模型可描述为 Π_{SIC}

$$\text{Max}\,W\text{lb}\left(1+\frac{g_i p_i x_i[t]}{\sigma^2+\sum_{\substack{k\in N\\ k\neq i}} p_k x_k[t]}\right),i,k\in N,j\in\Gamma_j,1\leqslant t\leqslant T \tag{11}$$

Subject to

$$p_i\in\left[\frac{\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1}}{g_i},P_{\max}\right],i\in N,j\in\Gamma_j \tag{12}$$

$$\sum x_i[t]+\sum x_k[t]\leqslant A_j,i,k\in N,k\neq i,1\leqslant t\leqslant T \tag{13}$$

$$\begin{aligned}&p_i=\frac{r_i\gamma_i}{Wg_i}\left(\sum_{k=1}^{i-1}\theta_k g_k p_k+\sum_{k=i+1}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W\right),\ i=2,\cdots,N\\&p_1=\frac{r_1\gamma_1}{Wg_1}\left(\sum_{k=2}^{N} g_k p_k+\sigma_0^2 W\right)\end{aligned} \tag{14}$$

式（12）是节点传输功率上下限约束条件，从式(12)可以看出，节点的传输功率控制 p_{ij} 在一个范围内随机取值，式(13)是二元制调度模型，但总数不能超过 SIC 解分组上限个数，式(14)是传输功率递推公式。

显然，从式(11)看出，最大化网络吞吐量是一

个 NP-Hard 问题，博弈论是解决复杂优化问题的常用数学工具，本文采用博弈论来优化功率控制。在无线网络中，节点之间共享信道资源和吞吐量，各节点之间动态调整发送功率，本文提出的基于多用户检测的 SIC 算法的功率控制作为一个非合作博弈问题，是用来模拟和研究这种相互作用的自然的框架和工具。定义 $G=<N,P,U>$，$N=\{n_1,n_2,\cdots,n_n\}$，表示网络中的 N 个节点，$P=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$ 是传输功率空间，由于节点的同构性，设节点为 n 个，假设存在 n 个传输功率空间 $p_1,p_2,\cdots,p_n$ 对应于节点 $1,2,\cdots,n$，每一个节点的传输功率的选择范围最小为 $p_{\min}$，最大为 $p_{\max}$，其中 $p_j^{\max}=p_{\max}$，$p_{\min}$ 最小可以为 0，则 $U(p)=(U_1(p),U_2(p),\cdots,U_n(p))$，对每一个节点来说，$U_i(p)=(p_i,p_{-i})(i=1,2,\cdots,n)$，$p_i$ 表示第 i 个节点采取的功率策略，p_{-i} 表示其余 $n-1$ 个节点对 i 节点的功率策略。由于对数函数 $\mathrm{lb}(x)$ 是单调增函数，令

$$\gamma_i=\frac{g_i p_i}{\sigma^2+\sum_{k\in N}^{k\neq i} g_k p_k} \tag{15}$$

设无线网络物理层的调制方案采用非相干频移键控调制(non-coherent FSK, non-coherent frequency shift keying)，则仿照文献[16]定义效用函数为

$$U_i(p_i,p_{-i})=\frac{br}{Fp_i}f(\gamma_i) \tag{16}$$

其中，函数表示节点 i 发送数据给节点 j，b 为有用信息比特数，F 为发送一个分组的比特数，r 为采用功率选择策略 p_i 的节点 i 的传输速率，$f(\gamma_i)$ 是随着接收节点 SINR 变化的效率函数

$$f(\gamma_i)=\left(1-\frac{1}{2}\mathrm{e}^{-\frac{\gamma_i}{2}}\right)^F \tag{17}$$

为了后续分析，考察 $f(\gamma_i)$ 的几个性质如下。

定理 1 如果数据帧长度 F 足够大，则 $f(\gamma_i)$ 随 γ_i 变化如图 2 所示。

1) $f(0)\to 0, f(\infty)\to 1$，$f(\gamma_i)$ 随 γ_i 单调递增；

2) $f'(0^+)\to 0, f'(\infty)\to 0$，$f'(\gamma_i)$ 有唯一的最大值点 $\overline{f'(\gamma_{\max})}$，$f'(\gamma_i)$ 在 $(0,\gamma_{\max})$ 单调递增，在 $(\gamma_{\max},\infty)$ 单调递减；

3) 在 $\gamma_i\in(0,2\ln(\frac{F}{2})]$，$f''(\gamma_i)\geqslant 0$，在 $\gamma_i\in(2\ln(\frac{F}{2}),\infty)$，$f''(\gamma_i)<0$。

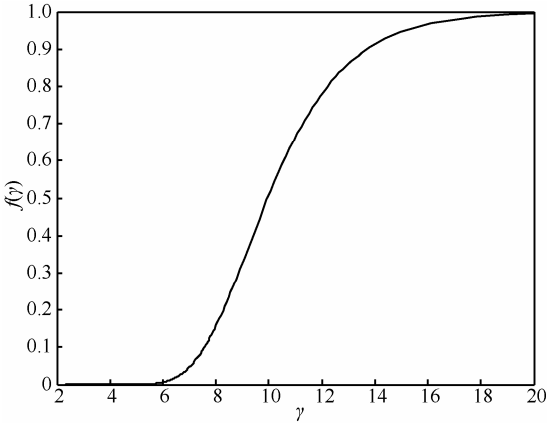

图 2 效率函数 $f(\gamma)$ 随 γ 变化趋势(F=100)

为描述方便，则 Π_{SIC} 可转化为 G_{NCGPC}

$$\begin{aligned} &U_i(p_i,p_{-i})=\frac{br}{Fp_i}f(\gamma_i)\\ &\text{Max}\quad f(\gamma_i)=(1-\frac{1}{2}\mathrm{e}^{-\frac{\gamma_i}{2}})^F \\ &\gamma_i=\frac{g_i p_i}{\sigma^2+\sum_{k\in N}^{k\neq i} g_k p_k}\end{aligned} \tag{18}$$

Subject to

$$p_i\in\left[\beta\sigma^2\frac{(\beta+1)^{A_j-1}}{g_i},P_{\max}\right],i\in N,j\in\Gamma_j \tag{19}$$

$$\sum x_i[t]+\sum x_k[t]\leqslant A_j,i,k\in N,k\neq i,1\leqslant t\leqslant T \tag{20}$$

$$\begin{aligned} &p_i=\frac{r_i\gamma_i}{Wg_i}(\sum_{k=1}^{i-1}\theta_k g_k p_k+\sum_{k=i+1}^{N}g_k p_k+\sigma_0^2 W),\ i=2,\cdots,N\\ &p_1=\frac{r_1\gamma_1}{Wg_1}(\sum_{k=2}^{N}g_k p_k+\sigma_0^2 W)\end{aligned} \tag{21}$$

定理 2 在 G_{NCGPC}，存在唯一的纳什均衡(NE) $\{\gamma_i^*\}$，其中 $\gamma_i^*\in(\gamma_i^{\min},\gamma_i^{\max})$，为 $f'(\gamma_i)=A_j$ 的根。

证明 设定无线节点 i 的 γ_i 集合为 $C_i=\{\gamma_i\,|\,\gamma_i^{\min}\leqslant\gamma_i\leqslant\gamma_i^{\max}\}$ 是欧式空间的紧致凸集合，则 U_i 是 γ_i 在 C_i 上的近似凹函数，根据文献[17]定理 1 的证明和后续文献[18,19]纳什均衡（NE）存在。

在 G_{NCGPC}，每个节点期望最大化自己的 U_i，令 $\frac{\partial U_i}{\partial\gamma_i}=0$，即 $f'(\gamma_i)=A_j$，根据定理 1，则 $f'(0^+)\to 0, f'(\infty)\to 0$，$f'(\gamma_i)$ 有唯一的最大值点 $\overline{f'(\gamma_{\max})}$，$f'(\gamma_i)$ 在 $(0,\gamma_{\max})$ 单调递增，在 $(\gamma_{\max},\infty)$ 单调递减，令 $\gamma_{\max}=\gamma_i^*$，则 $f'(\gamma_i)=A_j$ 有 2 个根 γ_i^0 和 γ_i^*，假定 $\gamma_i^0<\gamma_i^*$，则根据拉格朗日极点定理，有

$0<\gamma_i^0<\gamma_i^{\min}<\gamma_i^*<\gamma_i^{\max}$。则当 $\gamma_i<\gamma_i^0$ 和 $\gamma_i>\gamma_i^*$ 时，$f'(\gamma_i)<A_j$，当 $\gamma_i^0<\gamma_i<\gamma_i^*$ 时，$f'(\gamma_i)>A_j$。所以 γ_i^0 是 U_i 局部极小值，γ_i^* 是 U_i 局部极大值。又在边界 $\gamma_i^{\min}$ 和 $\gamma_i^{\max}$，$U_i=0$，所以 γ_i^* 是全局唯一的最大值：当 $\gamma_i^{\min}\leqslant\gamma_i'\leqslant\gamma_i^{\max}$，$U_i(\gamma_i,\gamma_{-i})\geqslant U_i(\gamma_i',\gamma_{-i}')$。因此 $\{\gamma_i=\gamma^*\}$ 是唯一的纳什平衡(NE)。

3.2　算法伪代码实现

1) 初始化：在 $t\leqslant T$ 的时间周期内，对每个传输节点 $i\in N$，设定传输功率范围 $p_{\min},p_{\max}$；设定 $b,r,F,W,\sigma^2,\theta,\beta$；

2) 对每一个传输节点 i，给定初始传输功率 $p_0\in(p_{\min},p_{\max})$，计算满足式(18)的传输功率 $\gamma_i,f(\gamma_i),U_i(p_i,p_{-i})$；

3) 循环更新节点信息，如果 p_i 满足式(19)、式(20)和式(21)，则确定非合作博弈论 G_{NCGPC} 的 NE；

4) 否则，重复步骤 3)，直到周期 T 结束。

4　数值仿真

根据 SIC 理论推导过程，图 3 和图 4 分别是 SIC 算法解码个数与 SINR 变化关系和无线节点传输功率与 SINR 关系。根据式（8）提供的 SIC 算法的上限计算公式，设置热噪声 $\sigma^2=0.005$，$p_j^{\max}=0.1$ W，可得出 β 与上限多分组接收个数的关系，如图 3 所示。从图中可以看出，多分组接收上限个数随 β 的增大迅速减少。当 β 很小时，sink 节点能同时接收 10 个数据分组并利用信号处理手段顺利解码 10 个数据分组，当 β=1 时，可同时接收 5 个数据分组，当 β=5 时，只能接收一个数据分组，这个结果符合理论推导。在第 3 章节讨论的非合作博弈论节点传输功率控制中，根据式（19）中参数，同样设置热

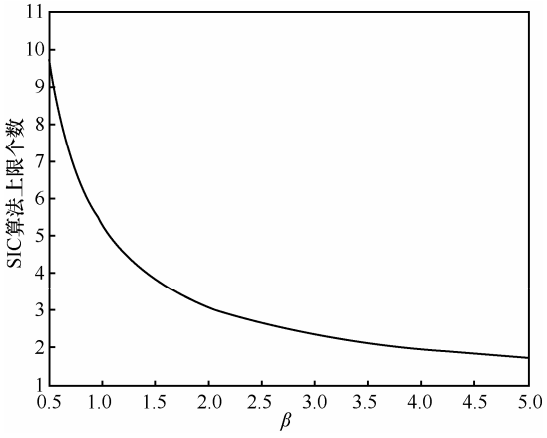

图 3　SIC 算法上限个数与 SINR 上限值 β 的关系

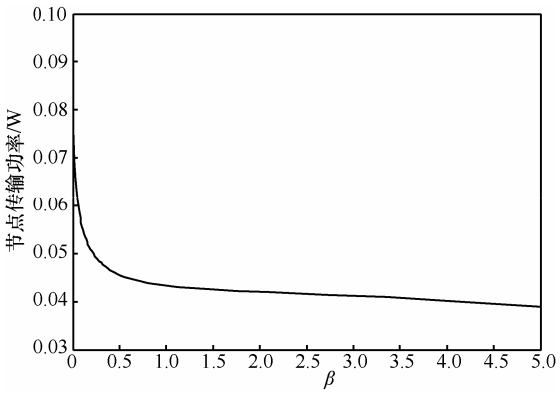

图 4　节点传输功率与 SINR 上限值 β 的关系

噪声 $\sigma^2=0.005$，$p_j^{\max}=0.1$ W，节点采用单极天线，则节点传输功率 p_i 与 SINR 的上限值 β 的关系如图 4 所示，从图中可以看出，非合作博弈论传感器节点功率选择随 β 的增大而减小，在 β 很小时，节点传输功率可以达最大值 0.1 W，当 β=5 时，节点功率只能有最大功率的 50%左右，因此，SIC 可以对无线节点进行功率控制。

对于 non-coherent FSK （非相干频移键控）调制方案中，令 $F=100$，$\sigma^2=0.005$，$r=2$ Mbit/s，$b=100$，$p_j^{\max}=0.1$ W，$g_i=20^{-4}$,通过求解式(18)，可求得纳什均衡 $\gamma^*=3.48$，传输功率 p_i 的值是 0.042 W。

图 5 所示为 G_{NCGPC} 的纳什均衡点的功率与 SIC 算法解码节点数的关系，图中 A_j 的取值在 1 至 10 之间，从图中可看出，纳什均衡点的传输功率与解码节点数的取值密切相关，与此同时，传输功率的信道增益参数 g 对纳什均衡影响也很大。

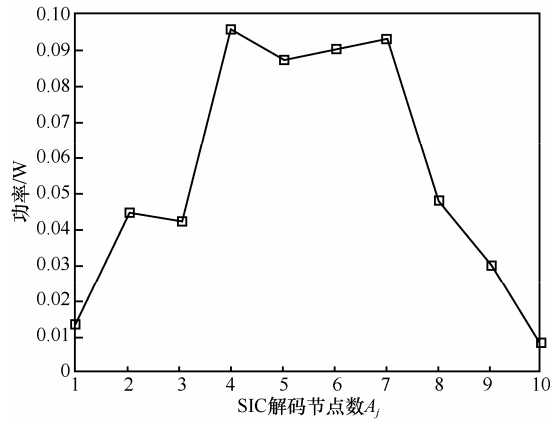

图 5　纳什均衡与 SIC 解码节点数关系

图 6 所示为在取得纳什均衡条件下 SIC 解码效率 θ=0 、θ=0.4 与 θ=1 相比较时最大吞吐量提高百分

比，当θ=0 时，SIC 完全解码，当θ=1 时，即为单分组接收。从图中可以看出，最大吞吐量提高比例随着扩频增益的增大而减小，在扩频增益为 50 时，解码效率θ=0 和θ=0.4 时最大吞吐量分别提高了 42%和 30%，在扩频增益为 100 时，解码效率θ=0 和θ=0.4 时最大吞吐量分别提高了 22%和 14%。

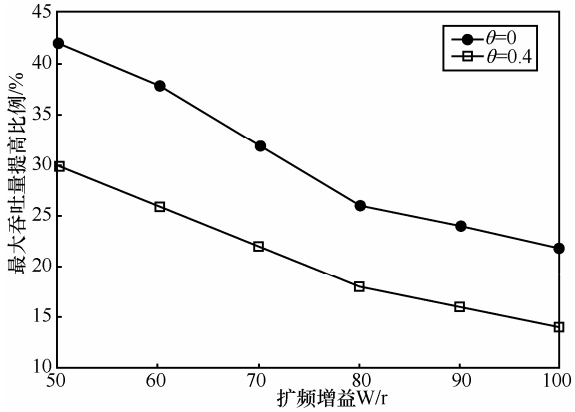

图 6　纳什均衡条件下最大吞吐量百分比提高率与 SIC 解码效率比较

利用 NS2 仿真采用非合作博弈论功率控制的 SIC 算法与采用其他算法的 SIC 算法网络吞吐量进行比较，基本参数设置与求得纳什均衡的参数一致，NS2 仿真参数设置如表 1 所示。则图 7 所示为 SIC 算法采用非合作博弈论节点传输功率控制与文献[3]、文献[4]和无功率控制的无线网络平均吞吐量对比关系，从图中可以看出，相比无功率控制的无线网络，采用非合作博弈论 SIC 功率控制提高网络吞吐量 70%，相比文献[3]和文献[4]采用的 SIC 算法，本文提出的非合作博弈论节点传输功率控制提高吞吐量 40%。

表 1　　NS2 仿真实验中的参数设置

参数	参数值
场景大小	100 m×100 m
节点个数	11(1 个基站节点，10 个无线节点)
最大传输距离/m	100
流量类型	CBR
带宽/(Mbit·s^{-1})	2
节点初始能量/J	1
接收功率/W	0.001
空闲功率/W	0.000 5
睡眠/空闲转换功率/W	0.000 1
最大传输功率/W	0.1
仿真时间/s	960

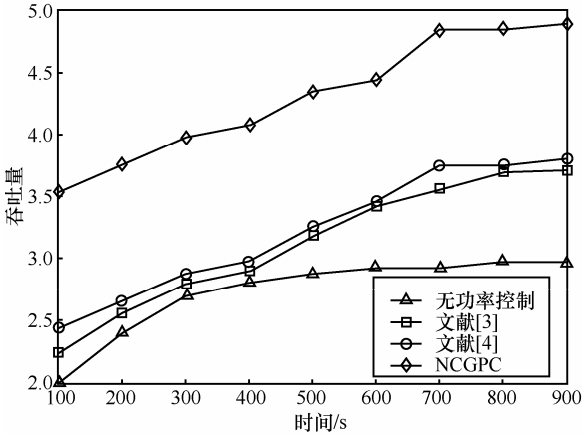

图 7　网络平均吞吐量对比

5　结束语

本文研究了在无线网络应用非合作博弈论功率控制实现 SIC 算法问题。分析了在无线网络实现 SIC 算法提高网络吞吐量是一个 NP-Hard 难题，推导了 SIC 算法的解码上限个数和功率控制递推公式，提出非合作博弈论功率控制模型，证明了纳什均衡的存在和唯一性。与其他 SIC 算法的功率控制算法相比，仿真结果验证了非合作博弈论功率控制实现 SIC 算法的优越性，大大提高了无线网络系统吞吐量，可实现 SIC 算法的功率控制。但是，本文提出的 SIC 算法的非合作博弈论功率控制，由于需要节点间信息的交互，增加了节点的通信开销。此外，非合作博弈论功率控制 SIC 算法的实现增加了接收端和发送端的时延。对于 SIC 算法功率控制下一步的研究方向就是应用其他更智能的方法，如神经网络，协同计算等来进一步提高无线网络的吞吐量。另一个研究方向是进一步改进 SIC 算法的时延问题。

参考文献：

[1] SEN S, SANTHAPURI N, CHOUDHURY R R, *et al*. Successive interference cancellation: a back-of-the-envelope perspective [A]. Proc of ACM HotNets-IX[C]. 2010. 11-15.

[2] LI E L, ALIMI R, SHEN D, *et al*. A general algorithm for interference alignment and cancellation in wireless networks [A]. Proc of IEEE INFOCOM'10[C]. 2010. 1774-1782.

[3] MOHAMMAD M, MICHAEL B R. The effects of ordering criteria in linear successive interference cancellation in CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11):4128-4131.

[4] JALALI S, KHALAJ B H. Power control for multirate DS-CDMA systems with imperfect successive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57 (1): 600-603.

[5] LV S, ZHUANG W, WANG X, *et al*. Scheduling in wireless ad hoc

networks with successive interference cancellation[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. 2011.1282-1290.

[6] YUAN D, ANGELAKIS V, CHEN L, *et al*. On optimal link activation with interference cancellation in wireless networking [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(2) :939-945.

[7] LEE S H, LEE I, LEE S R, *et al*. Joint user scheduling and adaptive intercell interference cancellation for miso downlink cellular systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 172-181.

[8] SHI H, WANG W, KWOK N, *et al*. Game theory for wireless sensor networks: a survey [J] .Sensors, 2012, 12:9055-9097.

[9] BACCI G, LUISE M. A game-theoretic perspective on code synchronization for CDMA wireless systems[J].IEEE J Sel Areas Commun, 2012 ,30(1):107–118.

[10] BACCI G, LUISE M. A pre-Bayesian game for CDMA power control during network association[J]. IEEE Journal of Selected Topics on Signal Process, 2012, 6(2):76–88.

[11] 桂丽, 钟晓峰,邹仕洪. 认知无线网络基于信号博弈的分布式功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2012,34(10):2527–2531.
GUI L, ZHONG X F, ZOU S H. Decentralizedpower control algorithm based on signaling games in cognitive radio networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012,34(10):2527–2531.

[12] XU Y, ANPALAGAN A, WU Q, *et al*. Game-theoretic channel selection for interference mitigation in cognitive radio networks with block-fading channels[A]. 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. 2013. 303-308.

[13] 殷作亮, 毛兴鹏, 张钦宇, 等. 实现MIMO 系统串行干扰消除迫零检测的快速递归算法[J]. 通信学报, 2012,33 (7):67-74.
YIN Z L, MAO X P, ZHANG Q Y, *et al*. Fast recursive algorithm for implementation of MIMO ZF-SIC detection[J]. Journal on Communications, 2012, 33 (7):67-74.

[14] 周朝荣, 李乐民, 张翼德, 等.采用串行干扰消除的DS-CDMA系统中速率分配与译码顺序调整的联合优化[J].电子与信息学报，2009, 31(6):1400-1404.
ZHOU Z R,LI L M,ZHANG Y D, *et al*. Joint optimization of rate allocation and decoding order adjustment in DS-CDMA systems with successive interference cancellation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6):1400-1404.

[15] JIANG C, SHI Y, HOU Y T, *et al*. Squeezing the most out of interference: an optimization framework for joint interference exploitation and avoidance [A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. 2012. 424-432.

[16] GOODMAN D，MANDAYAM N. Power control for wireless data[J]. IEEE Personal Communications, 2000,7(2):48-54.

[17] ROSEN J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concaven-person games [J]. Econometrica, 1965, 33(3):520-534.

[18] ENGUPTA S, CHATTERJEE M, KWIAT K A. A game theoretic framework for power control in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2009, 59(2):231-242.

[19] YERRAMALLI S J, MITRA R U. Coalitional games for transmitter cooperation in MIMO multiple access channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(4):757 -771.

作者简介：

胡松华（1976-），男，湖南邵阳人，合肥工业大学博士生，河南理工大学讲师，主要研究方向为无线网络优化、功率控制。

张建军（1963-），男，浙江宁波人，合肥工业大学教授、硕士生导师，主要研究方向为汽车电子、计算机集成制造技术、制造业信息化软件开发。

陆阳（1967-），男，安徽合肥人，合肥工业大学教授、博士生导师，主要研究方向为分布式控制、现场总线、嵌入式系统应用技术。

刘斌（1975-），男，山东郓城人，合肥工业大学博士生，主要研究方向为水下传感器网络、无线网络优化。

韩江洪[通信作者]（1954-），男，江苏南京人，合肥工业大学教授、博士生导师，主要研究方向为计算机控制、可靠性工程、无线网络。E-mail:hanjh@hfut.edu.cn。