



基于不完全信息动态博弈的多信道无线网络抗干扰传输

周恒杰, 孙闽红, 钟华, 刘玮

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 智能干扰机可以分析用户传输的历史, 并控制自己的行为, 给无线网络带来了新的威胁。针对多信道无线网络中用户与智能干扰机的对抗问题, 假定用户与智能干扰机在同一信道上传输, 双方以功率控制为策略, 将双方的对抗关系建模为不完全信息 Stackelberg 动态博弈模型, 得到各自的效益函数, 并在效益函数中考虑了干扰机的观测误差。然后, 对该博弈模型的 Stackelberg 均衡点进行了求解, 并证明了其存在性及唯一性。仿真结果验证了此多信道不完全信息 Stackelberg 博弈抗干扰模型的有效性。

关键词: 无线网络; 抗干扰; Stackelberg 博弈; 不完全信息; 功率控制

中图分类号: TN975

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018004

Anti-jamming transmission in a multi-channel wireless network based on incomplete information dynamic game

ZHOU Hengjie, SUN Minhong, ZHONG Hua, LIU Wei

College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Intelligent jammer can analyze the history of user's transmission and control their own behavior, so it has brought new threats to the wireless network. In order to analyze the behavior of users and intelligent jammers in a multi-channel wireless network, a dynamic Stackelberg game with incomplete information was modelled. In the model, it was assumed that the intelligent jammer followed the user and they transmitted at a same wireless channel, and both of them took power control as their strategy. Furthermore, their benefit functions were designed of which the observation error of the jammer was taken into account. Then, the Stackelberg equilibrium (SE) point of the game model was derived and the existence and the uniqueness of the SE were proved. The validity of the multi-channel dynamic Stackelberg game anti-jamming model with incomplete information was verified by simulations.

Key words: wireless network, anti-jamming, Stackelberg game, incomplete information, power control

1 引言

无线网络因其具有公开性而容易受到各类干

扰机的有意干扰, 存在较大的安全隐患。特别是智能干扰机具有学习用户的传输策略历史能力, 可根据用户的发射策略规律自适应地选择最优的干扰

收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271214, No.61301248)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271214, No.61301248)



策略,给无线网络安全带来了更为严峻的挑战。

无线网络中用户如何对抗干扰机是近年来研究的热点之一。研究人员普遍将两者之间的对抗视作一个博弈问题,探究基于博弈论^[1]的干扰对抗方法并努力获取博弈均衡点的解析解。这些研究根据双方掌握信息的程度不同可分为两大类:完全信息博弈与不完全信息博弈。在完全信息博弈方面,参考文献[2-5]在认知无线网络和无线 mesh 网络中基于静态博弈理论,建立了非合作博弈模型。参考文献[6]在此基础上,在效益函数中引入了跳频成本及传输成本,建立了非零和静态博弈模型。在无线网络中,Zheng 等人^[7-9]将对抗关系建立为零和静态博弈,求解了纳什均衡(Nash equilibrium, NE)。进而,基于动态博弈理论,Yang 等人^[10-12]将用户与智能干扰机的对抗建模为 Stackelberg 博弈(Stackelberg game, SG)模型,将用户和干扰机分别视作博弈中的领导者和追随者,且用户首先采取行动,干扰机基于用户的行动选择最优的干扰策略。参考文献[13]对干扰机存在观测误差情况的 SG 博弈进行了分析。参考文献[14]基于 SG 博弈,考虑了完全的信道增益信息及信道成本信息,建立了一个完全信息的多信道抗干扰博弈模型。

然而,上述工作中考虑的博弈中均假设博弈双方具有完全的信道信息及传输成本信息。事实上,假设博弈双方具有不完全信息与实际情况更为相符。基于不完全信息博弈的研究主要有如下几个方面。参考文献[15]将用户选择信道的情况作为不完全信息,并考虑选择信道的误差情况,分析并得到了 NE 解。参考文献[16,17]将发射机的位置距离信息作为不完全信息,建立了零和博弈模型,分析并求解了混合策略均衡解。最近,参考文献[18]建立了单用户与单个干扰机对抗环境下的贝叶斯 SG 模型,将信道状态信息和传输成本信息作为不完全信息,给出了该模型的 Stackelberg 均衡(Stackelberg equilibrium, SE)解,并证明了解的存在性和唯一性。

上述已有研究中,参考文献[14]提出的多信道模型是在完全信息 SG 博弈情况下分析的,且未考虑干扰机对于用户存在的观测误差情况。参考文献[18]未考虑干扰机与用户同时在同一信道上发射这一更严重的干扰现象。考虑到上述问题,本文从更符合实际的角度,假设在多信道条件下,干扰机与用户始终工作在同一信道,用户与干扰机对彼此的信道增益和发射成本等信息都是未知的,只知道自身的信道增益信息和自身发射成本状态的概率分布情况,将用户和干扰机之间的对抗建模为不完全信息的 SG 动态博弈模型。同时,将用户和干扰机两者各自的观测误差加以考虑,设计了更合理的效益函数。因此,本文的贡献主要体现在以下两个方面:以更符合实际的角度,建立了多信道传输条件下用户与智能干扰机之间的不完全信息 SG 动态博弈模型,求解了模型的 SE 解,并理论证明了其存在性与唯一性;将干扰机对于用户发射功率的观测误差加以考虑,设计了更合理的效益函数,仿真验证了该不完全信息 SG 动态博弈模型的有效性。

2 系统模型与分析

2.1 系统模型

假设无线网络中有 N 条信道,有一个用户(合法的收发对)和一台智能干扰机(恶意的发射机)。在信道 n 上,用户的增益为 α_n ($\alpha_n > 0$),干扰机在该信道上的增益为 β_n ($\beta_n > 0$)。用户及干扰机的传输成本分别为 C_s 和 C_j 。用户发射机首先选择信道发射信号,干扰机在感知到用户的信号后发送干扰信号,用户与干扰机始终在相同信道上工作。用户与干扰机都没有对方在各自信道上的增益信息以及自己的传输成本的状态信息,只有自身的信道增益信息及传输成本状态的概率分布信息。用户以功率 P 进行信号传输,以概率 $p_1, \dots, p_n, \dots, p_N$ 选择信道,且 $\sum_{n=1}^N p_n = 1$ 。干扰机在

感知用户的行为后,以功率 P_j 对用户选择的信道发送干扰信号。用户的传输成本状态 C_s 有 M 种状态情况,分别为 $C_{s1}, \dots, C_{sm}, \dots, C_{sM}$, 其概率分别为 $k_1, \dots, k_m, \dots, k_M$, 且 $\sum_{m=1}^M k_m = 1$ 。同样,干扰机的传输成本 C_j 有 H 种状态情况,分别为 $C_{j1}, \dots, C_{jh}, \dots, C_{jH}$, 其概率分别为 $\varphi_1, \dots, \varphi_h, \dots, \varphi_H$, 且 $\sum_{h=1}^H \varphi_h = 1$ 。

基于上述假设,可根据信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) 设定用户的效益函数为:

$$U_s = \sum_{n=1}^N p_n \frac{\alpha_n P}{\beta_n P_j + N_0} - \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P \quad (1)$$

其中, N_0 表示各个信道的噪声平均功率。类似地,智能干扰机的效益函数可表示为:

$$U_j = \sum_{n=1}^N p_n \frac{-\alpha_n P}{\beta_n P_j + N_0} + \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P - \sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} P_j \quad (2)$$

可将上述用户与干扰机的对抗视为一个动态博弈的过程。在该动态博弈模型中,用户被视为领导者,首先决定自己的行动,干扰机被视为追随者,根据用户的行动决定自己的行动。用户和干扰机的策略为选择它们自身的传输功率 P 和 P_j 。用户通过功率控制对抗干扰机的干扰,其目的在于最大化其得益。干扰机基于用户选择的策略,尽可能地减少用户的得益。因此,根据双方掌握的不完全信息、发射策略及效益函数,可以借助不完全信息动态 SG 理论来分析。以下利用逆向归纳法^[19]的方法寻找 SE。

2.2 追随者 (干扰机) 子博弈分析

在给定用户传输功率 P 的情况下,分析干扰机对应的最优策略选择,干扰机的得益表示为:

$$\bar{U}_j = \sum_{n=1}^N p_n \frac{-\alpha_n \tilde{P}}{\beta_n P_j + N_0} + \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \tilde{P} - \sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} P_j \quad (3)$$

其中, $\tilde{P}$ 表示干扰机对于用户的发射功率的预测值,干扰机对于用户发射功率的观测误差^[13]可定

义为 $\varepsilon = |\tilde{P} - P|/P$, 参考文献[14]未考虑此时干扰机对用户的观测误差值。

干扰机需要求解使得自身收益最大化的优化问题,即:

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{U}_j(\tilde{P}, P_j) \\ \text{s.t.} \quad & P_j \leq P_{jm} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, P_{jm} 表示为智能干扰机最大的传输功率值。

干扰机最优的传输功率 P_j 可表示为 $P_j = \arg \max_{0 \leq P_j \leq P_{jm}} \bar{U}_j(\tilde{P}, P_j)$ 。

命题 1 在求解式 (4) 的优化问题上,智能干扰机的最优发射功率策略可表示为:

$$P_j^* = \begin{cases} 0, \text{其他} \\ \sum_{n=1}^N p_n \frac{1}{\beta_n} \left(\sqrt{\frac{\alpha_n \beta_n \tilde{P}}{\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda}} - N_0 \right), \tilde{P} > \frac{N_0^2 (\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda)}{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n \beta_n} = A \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 表明,当 $\tilde{P} \leq A$ 时,智能干扰机将停止传输,即 $P_j^* = 0$ 。该结论与参考文献[14]相比,式 (5) 中有不完全信息的体现,并且考虑到了干扰机对用户发射功率的预测值 $\tilde{P}$, 且通过概率分布的情况来计算干扰机最优发射功率值,这样更为合理。

证明: 对 $\bar{U}_j$ 二次求导可得:

$$\frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial P_j^2} = \sum_{n=1}^N p_n \frac{-2\alpha_n \beta_n^2 \tilde{P}}{(N_0 + \beta_n P_j)^3} < 0 \quad (6)$$

式 (6) 表明,对于智能干扰机,得益函数是一个关于 P_j 的凹函数。因此,这个优化问题是一个凸优化问题。基于对偶优化理论^[20], 这个优化问题可以解决。首先,引入一个非负对偶变量 λ , 得到拉格朗日方程为:

$$\begin{aligned} L(\beta_0, P_j, \lambda) = & -\sum_{n=1}^N p_n \frac{\alpha_n \beta_0}{\beta_n P_j + N_0} + \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \beta_0 \\ & \sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} P_j + \lambda(P_{jm} - P_j) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 的拉格朗日对偶函数形式可表示为:



$$D(\lambda) = \max_{P_j \geq 0} L(\tilde{P}, P_j, \lambda) \quad (8)$$

则式(8)的对偶问题可写为:

$$d^* = \min_{\lambda \geq 0} D(\lambda) \quad (9)$$

求解这个优化问题, 可根据卡罗需—库恩—塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件^[15]得出:

$$\frac{\partial L(\tilde{P}, P_j, \lambda)}{\partial j} = \sum_{n=1}^N p_n \frac{\alpha_n \beta_n \tilde{P}_0}{(\beta_n P_j + N_0)^2} - \sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} - \lambda = 0 \quad (10)$$

显然, 式(5)可由式(10)得出。由于智能干扰器最优策略的优化问题是一个凸优化问题, 所以对偶问题的最优解其实是原问题的最优解。

2.3 领导者(用户)子博弈分析

首先可把用户的得益表示为:

$$U_s = \sum_{n=1}^N p_n \frac{\alpha_n P}{\beta_n P_j^* + N_0} - \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P \quad (11)$$

其中, P_j^* 表示为最优的干扰策略。类似第2.2节的分析, 首先将用户的最优策略建模为如下的最优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{P \geq 0} \quad & \bar{U}_s(P, P_j^*) \\ \text{s.t.} \quad & P \leq P_M \end{aligned} \quad (12)$$

其中, P_M 表示用户最大的传输功率, P_j^* 由式(5)得到。

命题 2 在求解式(12)的优化问题上, 用户的最优功率策略可表示为:

$$P^* = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \frac{p_n}{4} \cdot \frac{(\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda) \alpha_n}{(\sum_{m=1}^M k_m C_{sm} + \mu)^2 \beta_n}, \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \leq \Omega \\ \frac{N_1^2 (\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda)}{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n \beta_n}, \Omega < \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \leq \frac{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n}{N_0} \\ 0, \quad \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} > \frac{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n}{N_0} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\Omega = \frac{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n}{2N} - \mu$ 。与参考文献[14]相比,

式(13)中体现了不完全信息, P^* 的计算是根据用户选择信道的概率分布, 并在计算用户得益时为整个模型的整体得益情况, 这样更为合理。

证明: 将式(5)代入式(11), 可得:

$$\bar{U}_s = \begin{cases} \sum_{n=1}^N p_n \frac{\alpha_n P}{N_0} - \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P, P \leq \Lambda \\ \sum_{n=1}^N p_n \left(\sqrt{\frac{(\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda) \alpha_n P}{\beta_n}} \right) - \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P, P > \Lambda \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\Lambda = \frac{N_0^2 (\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda)}{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n \beta_n}$ 。观察式(14)可知,

当 $P \leq \Lambda$ 时, 用户的得益函数是关于 P 的线性函数; 当 $P > \Lambda$ 时, 由式(15):

$$\frac{\partial^2 \bar{U}_s}{\partial P^2} = \sum_{n=1}^N \frac{-p_n}{4P} \sqrt{\frac{(\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda) \alpha_n}{\beta_n P}} < 0 \quad (15)$$

可知, 此时用户的得益函数是一个关于 P 的凹函数。同样引入一个对偶变量 μ , 得到拉格朗日方程为:

$$\begin{aligned} L(P, P_j^*, \mu) \\ = \sum_{n=1}^N p_n \left(\sqrt{\frac{(\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda) \alpha_n P}{\beta_n}} \right) - \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} P + \mu(P_M - P) \end{aligned} \quad (16)$$

类似第2.2节的方法, 可得此时用户最优的发射功率为:

$$P_{\text{opt}} = \sum_{n=1}^N \frac{p_n}{4} \cdot \frac{(\sum_{h=1}^H \varphi_h C_{jh} + \lambda) \alpha_n}{(\sum_{m=1}^M k_m C_{sm} + \mu)^2 \beta_n} \quad (17)$$

由式(14)可知, 用户的最优功率配置 P^{SE} 如下。

- 当 $\sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \leq \Omega$ 时, $\Lambda \leq P_{\text{opt}}$ 。当 $P^* = P_{\text{opt}}$

时,可以得到最大的用户得益。

- 当 $\Omega < \sum_{m=1}^M k_m C_{sm} \leq \frac{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n}{N_0}$ 时, $P^* > P_{\text{opt}}$,

由前面的讨论结果可知,当 $P^* = A$ 时,可以得到最大的用户得益。

- 当 $\sum_{m=1}^M k_m C_{sm} > \frac{\sum_{n=1}^N p_n \alpha_n}{N_0}$ 时,用户的得益函数

$\bar{U}_s$ 是一个关于 P 的线性函数,在 $P^* = 0$ 时可以得到最大的用户得益,此时表示用户停止传输。

式(7)与式(16)中的非负对偶变量 λ 及 μ 可以由次梯度方法^[20]得到:

$$\begin{aligned}\lambda^{n+1} &= [\lambda^n - \Delta_\lambda^n (P_{jm} - J)]^+ \\ \mu^{n+1} &= [\mu^n - \Delta_\mu^n (P_m - P)]^+\end{aligned}\quad (18)$$

其中, n 代表迭代次数, Δ_λ^n 和 Δ_μ^n 代表迭代步长。

2.4 SE 的存在性及唯一性分析

根据参考文献[18]中的表述,最优策略 (P^*, P_j^*) 构成了 SE。因此对于任意且 $P_j \geq 0$, 有:

$$\begin{aligned}\bar{U}_s(P^*, P_j^*) &\geq \bar{U}_s(P, P_j^*), \\ \bar{U}_j(P^*, P_j^*) &\geq \bar{U}_j(P^*, P_j)\end{aligned}\quad (19)$$

定理 1 上述最优策略 (P^*, P_j^*) 构成的 SE 在不完全信息 Stackelberg 博弈中存在且唯一。

(1) 存在性

证明: 在给定发射机传输功率 P 时, 此博弈是一个非合作博弈。在干扰机的策略空间 $\{P_j: 0 \leq P_j \leq P_{jm}\}$ 是一个非空、欧氏空间的紧凸集。其得益函数 U_j 是一个关于 P_j 的连续凹集。

由参考文献[17]可知,至少存在一个 NE 在追随者(干扰机)的子博弈中。NE(P)表示为干扰机在给定 P 的情况下的最佳策略,则可将 SE 表示为:

$$\bar{U}_s(P^*, \text{NE}(P^*)) \geq \bar{U}_s(P, \text{NE}(P)) \quad (20)$$

因此,存在 P^* 满足式(21):

$$\bar{U}_s(P^*, \text{NE}(P^*)) = \sup_{P \geq 0} \bar{U}_s(P, \text{NE}(P)) \quad (21)$$

由此, SE 一定存在于此博弈中。

(2) 唯一性

证明: 在上述分析中,由式(6)知 $\bar{U}_j$ 二次求导的结果小于 0。因此,在给定发射机传输功率 P 的情况下, $\bar{U}_j$ 是一个关于 P_j 的凹函数,因此,干扰机存在一个最好的功率策略 NE(P^*)。同理,由第 2.3 节的分析可知,发射机也有唯一的最优功率。因此,在此 SG 中存在一个唯一的 SE。

3 仿真分析

对本文提出的 SG 博弈模型进行了性能仿真分析,参考了参考文献[13]的实验方案设计。考虑 $N=2$ 的情况,用户以等概率选择信道进行传输,干扰机对用户选择的信道进行干扰, C_s 、 C_j 各有两个状态值且以等概率进行分配。首先设定具体参数为: $N_0=0.1$, $P_{jm}=P_M=5$, $p=1/2$, $\alpha=[0.5 \ 0.65]$, $\beta=[0.45 \ 0.60]$, $C_j=[0.1 \ 0.3]$ 。为了对本文博弈模型的有效性进行分析,将其与参考文献[13]中基于完全信息的 SG 模型在无线网络中的情况进行比较。图 1 给出了在干扰机观测误差 ε 变化的情况下,用户的得益 $\bar{U}_s$ 与用户传输成本 C_s 的关系。

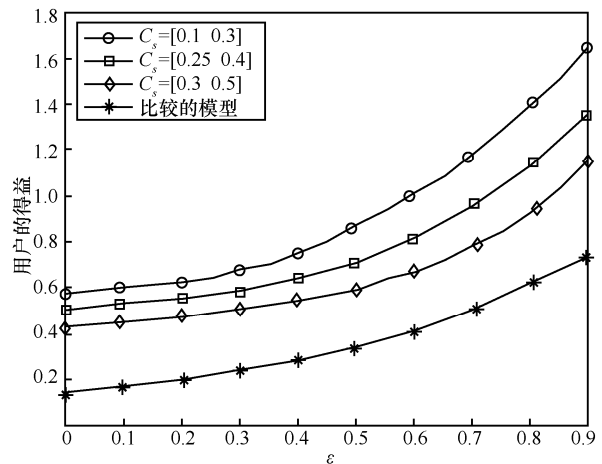


图 1 干扰机观测误差 ε 变化的情况下, 用户的得益 $\bar{U}_s$ 与用户传输成本 C_s 的关系

从图 1 中可以看出, 不完全信息 SG 多信道模型中的用户得益明显优于参考文献[13]的模型, 且



用户的传输得益随着干扰机观测误差值的增大而增加；当 ε 不变时，随着传输成本的增大，用户的得益减少。

图 2 给出了在干扰机观测误差 ε 变化的情况下，完全传输成本信息与不完全传输成本信息时用户得益 $\bar{U}_s$ 的变化情况。在观测误差 ε 增大的情况下：在不完全传输成本信息的情况下（ $C_s=[0.1\ 0.3]$ ），用户的得益 $\bar{U}_s$ 大于当完全传输成本信息为 $C_s=0.3$ 时用户的得益，同时小于当完全传输成本信息为 $C_s=0.1$ 时用户的得益。

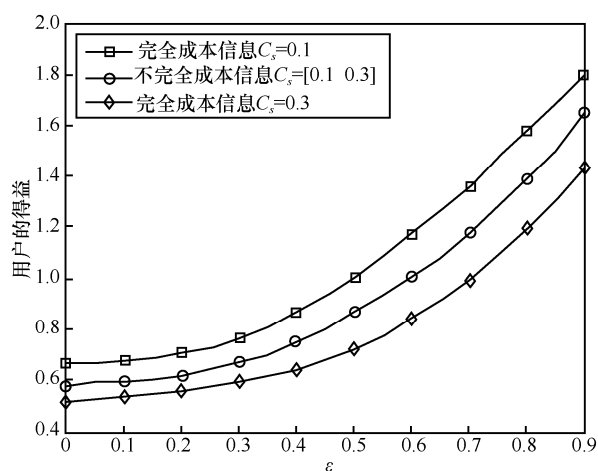


图 2 干扰机观测误差 ε 变化的情况下，完全传输成本信息与不完全传输成本信息用户得益的比较

图 3 给出了在不完全传输成本下，智能干扰机在其观测误差 ε 变化时，干扰机的得益 $\bar{U}_j$ 与

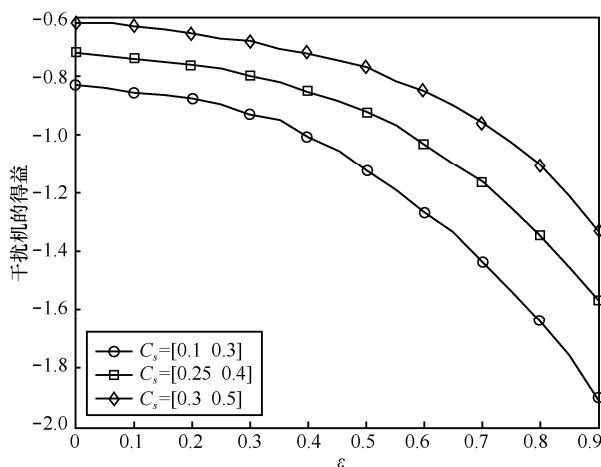


图 3 不完全传输成本下，智能干扰机在其观测误差 ε 变化时，干扰机的得益 $\bar{U}_j$ 与用户传输成本 C_s 的关系

用户传输成本 C_s 的关系。在 ε 增大的情况下，干扰机的得益会下降；而 ε 不变时，随着用户传输成本的增加，干扰机的得益 $\bar{U}_j$ 会增大。

4 结束语

本文基于不完全信息动态博弈理论，在无线网络中存在多信道的情况下，对功率控制抗干扰的方法进行了研究。将用户和干扰机的对抗关系建模为不完全信息 SG 模型，用户作为领导者，首先做出行动，干扰机作为追随者，在用户做出行动的基础上给出最优的策略，推导出了 SE，并证明了其存在性及唯一性。通过仿真分析，验证了此多信道不完全信息 SG 博弈抗干扰模型的有效性，且得到了当智能干扰机的观测误差值 ε 增加时，用户的得益增加，而干扰机的得益减少；当 ε 值不变时，用户的得益随用户传输成本值增加而减少，干扰机的得益随用户传输成本值增加而增加。另外，在不完全传输成本信息情况下（ $C_s=[0.1\ 0.3]$ ），用户得益的大小在最大完全信息传输成本（ $C_s=0.3$ ）和最小完全信息传输成本（ $C_s=0.1$ ）的用户得益之间。

参考文献:

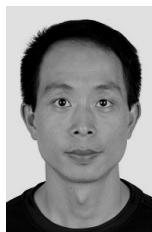
- [1] FUDENBERG D, TIROLE J. Game theory[J]. Mit Press Books, 2009, 1(7): 841-846.
- [2] CHEN C, SONG M, XIN C S, et al. A game-theoretical anti-jamming scheme for cognitive radio networks[J]. IEEE Network, 2013, 27(3): 22-27.
- [3] GARNAEV A, HAYEL Y, ALTMAN E. A Bayesian jamming game in an OFDM wireless network[C]//International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, May 14-18, 2012, Paderborn, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2012: 41-48.
- [4] 彭青, 肖海林. 基于博弈论的认知无线电自适应功率控制算法[J]. 电信科学, 2013, 29(1): 46-50.
PENG Q, XIAO H L. Adaptive power control algorithm based on game theory in cognitive radio[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(1): 46-50.
- [5] 郑鹏宇, 何世彪, 戴昊峰, 等. 一种基于博弈论的无线 mesh 网络信道分配算法[J]. 电信科学, 2013, 29(7): 59-65.
ZHENG P Y, HE S B, DAI H F, et al. A wireless mesh network

- channel assignment based on game theory[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(7): 59-65.
- [6] DABCEVIC K, BETANCOURT A, MARCENARO L, et al. A fictitious play-based game-theoretical approach to alleviating jamming attacks for cognitive radios[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 4-9, 2014, Florence, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2014: 8158-8162.
- [7] ZHENG J, CAI Y, XU Y, et al. Distributed channel selection for interference mitigation in dynamic environment: a game-theoretic stochastic learning solution[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4757-4762.
- [8] YUAN Z, WANG S, XIONG K, et al. Game theoretic jamming control for the Gaussian interference wiretap channel[C]// International Conference on Signal Processing, Oct 19-23, 2014, Hangzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1749-1754.
- [9] XU X, GAO K, ZHENG X, et al. A zero-sum game theoretic framework for jamming detection and avoidance in Wireless Sensor Networks[C]//International Conference on Computer Science and Information Processing, Aug 24-26, 2012, Xi'an, China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 265-270.
- [10] YANG D, ZHANG J, FANG X, et al. Optimal transmission power control in the presence of a smart jammer[C]//Global Communications Conference, Dec 3-7, 2012, Anaheim, USA. Piscataway: IEEE Press, 2012: 5506-5511.
- [11] LI Y, XIAO L, LIU J, et al. Power control Stackelberg game in cooperative anti-jamming communications[C]//International Conference on Game Theory for Networks, Nov 25-27, 2014, Beijing, China. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [12] TANG X, REN P, WANG Y, et al. Securing wireless transmission against reactive jamming: a stackelberg game framework[C]//2015 IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [13] XIAO L, CHEN T, LIU J, et al. Anti-jamming transmission stackelberg game with observation errors[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(6): 949-952.
- [14] YANG D, XUE G, ZHANG J, et al. Coping with a smart jammer in wireless networks: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4038-4047.
- [15] NGUYEN K C, ALPCAN T, BASAR T. Security games with incomplete information[C]//IEEE International Conference on Communications, June 14-18, 2009, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [16] SCALABRIN M, VADORI V, GUGLIELMI A V, et al. A zero-sum jamming game with incomplete position information in wireless scenarios[C]//21th European Wireless Conference, May 20-22, 2015, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [17] VADORI V, SCALABRIN M, GUGLIELMI A V, et al. Jamming in underwater sensor networks as a bayesian zero-sum game with position uncertainty[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [18] JIA L L, YAO F Q, SUN Y M, et al. Bayesian stackelberg game for anti-jamming transmission with incomplete information[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 1991-1994.
- [19] AUMANN R J. Backward induction and common knowledge of rationality[J]. Games & Economic Behavior, 1995, 8(1): 6-19.
- [20] DING G, WU Q, WANG J. Sensing confidence level-based joint spectrum and power allocation in cognitive radio networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(1): 283-298.

[作者简介]



周恒杰 (1993-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为电子对抗、博弈论等。



孙闽红 (1974-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院副教授, 主要研究方向为雷达/通信信号处理、电子对抗。



钟华 (1978-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院讲师, 主要研究方向为雷达/通信信号处理、电子对抗等。



刘玮 (1978-), 男, 博士, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为物联网与信号处理。