DOI：10.7652/xjtuxb201602011

采用博弈论的认知无线网络主用户和不可信任次用户的协作策略

马亚燕，王保云
（南京邮电大学通信与信息工程学院，210003，南京）

摘要：针对认知无线网络中不可信任的次用户发送者(ST)会对主链路进行窃听的问题，以将主用户发送者(PT)和ST之间的敌对关系转化为协作关系为目的，提出2种采用博弈论的协作策略：斯塔伯格策略及其改进策略——双层博弈策略。在斯塔伯格策略中，ST工作于半双工模式，和窃听相比，它更希望传送数据，因此PT轮流和每个ST进行斯塔伯格博弈，选择对未被选中的ST(即潜在的窃听者)产生更多干扰的ST一起使用授权频段发送数据。为促进ST之间的竞争，将斯塔伯格策略扩展为双层博弈策略，外层仍是斯塔伯格策略，PT将所有的ST看作一个整体进行博弈；内层拍卖博弈中，每个ST尽可能提高安全速率来赢得接入授权频段的机会，PT则选择能提供最高安全速率的ST进行合作，因此它能够获得更高的收益。仿真结果表明，在这2种策略作用下，主链路的安全速率分别提高了63%和68%，ST接入授权频段的概率分别为56%和71%。

关键词：认知无线网络；博弈论；合作；安全
中图分类号：TN409 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2016)02-0061-07

Cooperation Schemes Between the Primary Transmitter and Untrusted Secondary Transmitters in Cognitive Radio Networks Using Game Theory

MA Yayan, WANG Baoyun
(College of Telecommunications and Information Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Two cooperation schemes using game theory are proposed to solve the problem that the untrusted secondary transmitters (STs) will eavesdrop on the primary link in cognitive radio networks and to covert the hostile relation between the primary transmitter(PT) and STs into a cooperative one, and they are a Stackelberg scheme and an improved two-layer game. The STs work in half-duplex and prefer to transmit than to eavesdrop in the Stackelberg scheme. Hence, the PT plays the Stackelberg game with each ST, and then selects the ST who creates more interference to the unselected STs(i.e. the potential eavesdroppers) to transmit simultaneously. The Stackelberg scheme is then extended into a two-layer game to facilitate the competition among the STs. The outer framework is still a Stackelberg model and the PT plays game with all the STs as an entity, while the inner has an auction framework in which each ST improves its security rate as much as possible for the access opportunity. The PT will conduct cooperation with the ST having the highest security rate, so that more profit can be obtained. Numerical

收稿日期：2015-05-25。 作者简介：马亚燕(1979—)，女，博士生；王保云(通信作者)，男，教授，博士生导师。 基金项目：国家自然科学基金资助项目(61271232,61372126)；江苏省高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0472)。
网络出版时间：2015-12-02 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151202.1858.004.html

results show that application of these two proposed schemes results in a significant improvement: the security rate of the two schemes increases by 63% and 68% respectively, and the access opportunity of STs is 56% and 71% respectively.

Keywords: security; game theory; cooperation; cognitive radio networks

随着无线通信业务需求的爆炸式增长,频谱资源匮乏的问题变得日益严重。认知无线电技术允许次用户在不影响其他授权主用户正常通信的前提下复用稀缺的频谱资源,因此与传统的固定频谱分配方式相比提高了系统的频谱效率[1]。然而,由于无线信道的广播特性,认知无线电技术在提高频谱利用率同时也面临着严重的通信安全问题[2]。文献[3-5]从节点间协作的角度对如何提高认知无线电系统中主用户间通信安全进行了研究。现有协作策略大致可分为友好干扰[3]、合作中继[4]以及友好干扰与合作中继相结合[5]3 类。

在认知无线网络中,如果次用户是不可信任的,即部分次用户节点会对主链路的通信进行窃听,那么主用户和次用户之间的合作会变得异常复杂[6-7]。文献[7]中次用户发送者(ST)工作于半双工模式,只有在主用户发送者(PT)允许它们使用授权频段发送数据时,才不会对主链路的数据进行窃听。Karim Khalil 提出了有效的使用斯坦格尔伯格博弈的安全协作策略[7],PT 选择一个合适的 ST 和它一起发送数据,该 ST 对未被选中的 ST(即潜在的窃听者)产生较多的干扰,从而增强了主链路的安全性。虽然此协作策略是有效的,但是该策略中 ST 只能在被 PT 选中后决定是否接入授权频段进行传输,因此没有激发起 ST 之间的竞争;其次该策略不允许 PT 和 ST 调整自己的发送功率,因此会错失部分合作机会,即使合作也不能以最佳功率传输数据,在一定程度上损失了部分性能。

为此,本文首先给出了 PT 和 ST 协作的充分必要条件;然后,在文献[7]的基础上提出了采用斯塔伯格博弈的协作策略,并求出了相应博弈的纳什均衡点。与文献[7]中协作策略不同的是,本文所提出的斯塔伯格策略中 PT 的行动是选择合适的发送功率以及合适的 ST 进行合作,ST 的行动是选择合适的发送功率以及被 PT 选中后是否接入授权频段进行传输。为了激发 ST 之间的竞争性,采用第二密封拍卖博弈[8]来模拟它们之间的相互作用,将该博弈作为上一步斯塔伯格博弈的子博弈,形成基于双层博弈的协作策略,并得出内层第二价格密封拍卖博弈的占优均衡以及外层斯塔伯格博弈的纳什均衡。仿真结果表明,本文所提 2 种协作策略均可明显提高主链路的安全速率和 ST 接入授权频段的机会。

1 系统模型

考虑如图 1 所示的认知无线电模型,包括 1 对主用户和 2 对次用户:PT 拥有授权频道的使用权,需要将数据安全地发送给相应的接收者;2 个 ST 都工作于半双工模式,希望借助于授权频段发送数据给各自的接收者,它们在空闲时隙能够感知到授权频段并接受 PT 的信息(即窃听),以此威胁 PT 允许它们使用授权频道发送数据。如果 PT 允许其中一个 ST 接入授权频段,另一个 ST 依然选择窃听;当被选中的 ST 发送的数据对主用户接收者(primary receiver, PR)产生的干扰小于对另一个 ST 产生的干扰时,主链路的安全性得以增强;被选中的 ST 也可借助于授权频段发送数据,和 PT 由敌人转化为朋友。因此,对 PT 而言,所有的 ST 既是潜在的敌人,也是潜在的朋友。

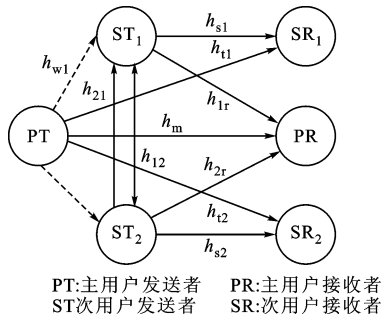

图 1 系统模型

各链路的信道参数设置如下:主用户对之间的瞬时功率复增益为 h_{m},次用户对之间的瞬时功率复增益分别为 h_{s1}、h_{s2}(类似地,可以定义如图 1 所示的其他信道参数 h_{w1}、h_{w2}、h_{21}、h_{12}、h_{i1}、h_{i2}、$h_{1\mathrm{r}}$、$h_{2\mathrm{r}}$);PT 和 ST 的发送功率分别为 P_{p} 和 P_{si},它们的最大发送功率为 $P^{\max}$;假设所有链路的噪声功率均为 σ^2。

2 斯塔伯格策略

假设所有节点是理性和自私的,则可以用博弈论来研究这类节点的相互作用[9]。因为 PT 在接入授权频段时具有更高的优先权,所以本节使用斯塔伯格博弈[8-10]来分析 PT 和 ST 之间的相互作用,其

中 PT 和 ST 分别是领导者和跟随者，前者的行动是选择发送功率 P_p 以及选择合适的 ST 进行合作，后者的行动是选择发送功率 P_{si}；博弈进行时，PT 先行动，随后每个 ST 作出最佳反应来最大化各自的效用函数。

2.1　效用函数

假设 ST_i 被选中，定义

$$j \in \{1,2\},\quad j \neq i \tag{1}$$

则 ST_j 是主链路的窃听者。

PT 的效用函数是主链路的可达安全速率；假设它选中 ST_i 一起传输数据，则主链路的可达安全速率为

$$R_s^i(P_p,P_{si}) = \left[\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_p h_m}{\sigma^2+P_{si}h_{ir}}\right)-\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_p h_{wj}}{\sigma^2+P_{si}h_{ij}}\right)\right]^+ \tag{2}$$

式中：j 如式(1)所定义；$[x]^+=\max(x,0)$。

被选中 ST_i 的效用函数为

$$U_{si}(P_p,P_{si}) = \left[\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_{si}h_{si}}{\sigma^2+P_p h_{ti}}\right)-c_{si}P_{si}\right]^+ \tag{3}$$

式中：c_{si} 是 ST_i 的单位传输功耗。

当 2 个 ST 都选择窃听时，主链路的可达安全速率为

$$R_s^0 = \min_{i=1,2}\left[\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_p h_m}{\sigma^2}\right)-\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_p h_{wi}}{\sigma^2}\right)\right]^+ \tag{4}$$

2.2　协作条件

为了更好地分析 PT 和 ST 之间的相互作用，首先分析它们效用函数的性质。

定理 1　当 $P_{si}\geqslant 0$ 时，$R_s^i(P_p,P_{si})$ 是关于 P_{si} 的连续函数并且具有以下性质：①当且仅当 $A(i,j)>0$，$C(i,j)<0$ 时，函数 $R_s^i(P_p,P_{si})$ 是关于 P_{si} 的拟凹函数，并且在区间 $[\max(-B(i,j)/2A(i,j),0),P_{si}(1)]$ 上大于 R_s^0；②当且仅当 $C(i,j)>0$、$B(i,j)>0$ 时，函数 $R_s^i(P_p,P_{si})$ 是关于 P_{si} 的减函数，并且在区间 $[0,\min(\max(0,-B(i,j)/2A(i,j)),+\infty)]$ 上大于 0，其中 $A(i,j)=h_{ij}h_{ir}(h_{ij}h_m-h_{wj}h_{ir})$，$B(i,j)=2h_{ij}h_{ir}\sigma^2(h_m-h_{wj})$，$C(i,j)=\sigma^4(h_{ir}h_m-h_{wj}h_{ij})+\sigma^2h_m h_{wj}P_p(h_{ir}-h_{ij})$，$P_{si}(1)=[-B(i,j)+(B(i,j)^2-4A(i,j)C(i,j))^{1/2}]/2A(i,j)$。

证明　参见附录 A。

很容易看出，$U_{si}(P_p,P_{si})$ 是关于 P_{si} 的凹函数，当 $P_{si}\to+\infty$ 时，$U_{si}(P_p,P_{si})<0$ 且 $U_{si}(P_p,0)=0$，所以当且仅当 $D_{si}=\partial U_{si}(P_p,P_{si})/\partial P_{si}\big|_{P_{si}=0}>0$ 时，$U_{si}(P_p,P_{si})$ 在区间 $0\leqslant P_{si}\leqslant P_{si}^0$（$P_{si}^0$ 是 $U_{si}(P_p,P_{si})=0$ 关于 P_{si} 的非零解）上有大于 0 的值，此时 ST_i 才愿意参加合作。定义

$$k = \arg\max_{i=1,2}(h_{wi}) \tag{5}$$

$$P_{si}^{\lim} = \min(P_{si}^0,P^{\max}) \tag{6}$$

则 ST_k 是 2 个 ST 中窃听能力较强的那个用户，$P_{si}^{\lim}$ 是 ST_i 所能接受的最大发送功率。

根据定理 1，当 $A(i,j)>0$，$C(i,j)<0$ 时，PT 和 ST_i 的合作能够提高主链路的安全速率；当 $C(i,j)>0$，$B(i,j)>0$ 时候，如果 ST_i 的窃听能力大于另外一个 ST，即 $i=k$，因为它接入授权频段后不会对主链路进行窃听，所以它和 PT 的合作能够加强主链路的安全性。综上，当且仅当不等式(7)或(8)的条件满足时，PT 和 ST_i 将进行合作，并且主链路的安全速率大于 R_s^0，即

$$A(i,j)>0;C(i,j)<0;P_{si}^{\lim}>\max(-B(i,j)/2A(i,j),0);D_{si}>0 \tag{7}$$

$$i=k,D_{si}>0;C(i,j)>0;B(i,j)>0 \tag{8}$$

2.3　斯塔伯格纳什均衡

定义 1　当不等式(9)和(10)的条件都满足时，(P_p^*,P_{si}^*) 是本文所提出的斯塔伯格博弈的纳什均衡点[8]。

$$R_s^i(P_p^*,P_{si}^*)\geqslant R_s^i(P_p,P_{si}^*) \tag{9}$$

$$U_{si}(P_p^*,P_{si}^*)\geqslant U_{si}(P_p^*,P_{si}) \tag{10}$$

从定义 1 可以看出，PT 和 ST 在纳什均衡点的行动是对对方行动的最佳反应，可以根据后向分析法[8]来求解该均衡。

给定 PT 的发送功率 P_p，ST_i 的最佳发送功率是如下优化问题的解

$$P_{si}^*(P_p) = \arg\max_{P_{si}(P_p)} U_{si}(P_p,P_{si}(p_p))$$
$$\text{s.t.}\quad 0\leqslant P_{si}\leqslant P_{si}^{\lim} \tag{11}$$

因此，被选中 ST_i 的最佳发送功率为

$$P_{si}^*(P_p) = \left[\frac{1}{c_{si}\ln 2}-\frac{P_p h_{ti}+\sigma^2}{h_{si}}\right]_0^{P_{si}^{\lim}} \tag{12}$$

PT 的最佳发送功率是如下优化问题的解

$$P_p^* = \arg\max_{P_p} R_s^i(P_p,P_{si}^*(P_p))$$
$$\text{s.t.}\quad 0\leqslant P_p\leqslant P^{\max} \tag{13}$$

因此，等式(12)和(13)给出了斯塔伯格博弈的均衡解。

2.4　胜出者的确定

首先 PT 轮流和 2 个 ST 进行斯坦格尔伯格博

弈，接着选出能够给它提供最大安全速率的 ST 进行合作。被选中 ST 的序号为

$$w = \arg\max_{i=1,2} R_s^i(P_p^*, P_{si}^*)$$
$$\text{s.t.} \quad R_s^i(P_p^*, P_{si}^*) > R_s^0 \tag{14}$$

3 双层博弈策略

3.1 双层博弈的基本概念

与文献[7]相比，上节提出的方案给予了 PT 和 ST 更多的主导权，但是它没有激发起 ST 之间的竞争，因此，这里采用双层博弈来模拟 PT 和多个 ST 之间的相互作用，其中内层采用拍卖博弈研究 ST 之间的竞争；外层仍采用第 2 节所描述的斯塔伯格博弈来研究 PT 和多个 ST 之间的相互作用，领导者仍然是 PT，跟随者则由单个 ST 变更为所有的 ST；内层拍卖博弈中胜出的 ST 的最佳发送功率选择，恰好是外层斯塔伯格博弈中它对 PT 发送功率的最佳反应。

3.2 第二价格密封拍卖

在现有的多种拍卖策略中，第二价格密封拍卖能够保护竞拍者的隐私，胜出的竞拍者只需支付给拍卖者所有报价中的第二高报价，每个竞拍者的最优行动是按照它对标的的完全估价进行报价，该行动恰好是博弈理论中的占优均衡[8]。

因此，本节采用第二价格密封拍卖来研究 ST 之间的竞争，其中 PT 和 ST 分别是拍卖者和竞拍者；ST 的报价是它和 PT 一起发送数据时主链路的安全速率（如式(2)所定义）；PT 只接受大于 R_s^0 的报价，并选中报价最高的 ST 使用授权频段一起传输数据，该 ST 只需保证主链路的安全速率达到所有报价中的第二高安全速率。

假设 ST_i 的最优行动是选择发送功率 P_{si}^{bid}，则被选中的 ST 的序号为

$$v = \arg\max_{i=1,2} R_s^i(P_p, P_{si}^{\text{bid}}) \tag{15}$$

式中：$R_s^i(P_p, P_{si}^{\text{bid}}) > R_s^0$；否则，将没有 ST 被选中。当出现相同的报价时，由 PT 随机决定。第二高报价如下

$$R_s^2 = \max_{i \neq v}(\max(R_s^i(P_p, P_{si}^{\text{bid}}), R_s^0) \tag{16}$$

如果 ST 被 PT 选中，其效用函数如式(3)所定义。

3.3 占优均衡

为了增加被 PT 选中的机会，ST 将尽可能地调整自己的竞标功率来提高主链路的安全速率，因此给定 PT 的发送功率 P_p，ST_i 的占优行动 P_{si}^{bid} 是如下优化问题的解

$$P_{si}^{\text{bid}} = \arg\max_{P_{si}} R_s^i(P_p, P_{si})$$
$$\text{s.t.} \quad 0 \leqslant P_{si} \leqslant P_{si}^{\lim}$$
$$R_s^i(P_p, P_{si}^{\text{bid}}) > R_s^0 \tag{17}$$

该优化问题的解如定理 2 所述。

定理 2 给定主用户发送者的发送功率 P_p，当不等式(7)满足时，次用户发送者 i 的占优行动 P_{si}^{bid} 为

$$P_{si}^{\text{bid}}(P_p) = \min(P_{si}^{\lim}, P_{si}(1)) \tag{18}$$

式中：$P_{si}(1)$ 由定理 1 给定。当不等式(8)满足时，次用户发送者 i 的占优行动为

$$P_{si}^{\text{bid}}(P_p) = 0 \tag{19}$$

证明 参见附录 B。

说明 1 如果 $h_{wi} = h_{wj}$，那么当且仅当条件(7)满足时 ST_i 的合作才能够提高主链路的安全速率，此时它的竞标功率为 $\min(P_{si}^{\lim}, P_{si}(1))$。

说明 2 因为本文采用的是第二价格密封拍卖，如果竞拍功率为零的 ST 赢得了拍卖，它只需提供第二高报价的安全速率，所以能够以大于 0 的发送功率传输数据。

3.4 胜出者的最佳功率选择

胜出 ST 的序号 v 由式(15)所定义。传统的拍卖理论中，拍卖者和竞拍者的效用函数分别是价格的递增和递减函数。然而从 2.2 小节可以看出，PT 和 ST 的效用函数 $R_s^i(P_p, P_{si})$ 和 $U_{si}(P_p, P_{si})$ 在 P_{si} 的一些特定区域具有相同的单调性，因此我们对传统的第二价格密封拍卖策略稍加修改：被选中的竞拍者需付给拍卖者不小于第二报价的费用。在这样的设定下，在保证主链路安全速率不小于第二报价 R_s^2 的基础上，胜出的 ST 可以任意调整自己的发送功率 P_{si} 来最大化自己的效用函数 $U_{si}(P_p, P_{si})$，从而拍卖双方的性能能够同时得到提高。

定理 3 胜出次用户发送者 v 的最佳发送功率为

$$P_{sv}^{\text{opt}}(P_p) = \begin{cases} P^{\text{SH}}(P_p), & P_{sv}^*(P_p) > P^{\text{SH}}(P_p), \\ & R_s^2 > 0; \\ P^{\text{SL}}(P_p), & P_{sv}^*(P_p) < P^{\text{SL}}(P_p), \quad R_s^2 > 0; \\ P_{sv}^*(P_p), & P^{\text{SL}}(P_p) \leqslant P_{sv}^*(P_p) \leqslant P^{\text{SH}}(P_p), \\ & R_s^2 > 0; \\ P_{sv}^*(P_p), & R_s^2 = 0。 \end{cases} \tag{20}$$

式中：$P_{sv}^*(P_p)$ 由式(12)给定；$P^{\text{SL}}(P_p)$ 和 $P^{\text{SH}}(P_p)$ 为次用户送者 v 使得主链路安全速率等于 R_s^2 的 2 个发送功率，两者之间的关系满足 $P^{\text{SL}}(P_p) < P_{sv}^{\text{bid}}(P_p) < P^{\text{SH}}(P_p)$，$R_s^2$ 由式(16)给定。

证明 参见附录 C。

3.5　斯塔伯格纳什均衡

式(20)给出的结果是外层斯塔伯格博弈中 ST 对 PT 的功率选择 P_p 的最佳反映，因此和第 2 节类似，采用后向分析法求出 PT 的最佳发送功率为

$$P_p^{bid^*} = \arg\max_{P_p} \quad R_s(P_p, P_{sv}^{opt}(P_p))$$
$$\text{s.t.} \quad 0 \leqslant P_p \leqslant P^{max} \tag{21}$$

式(20)和(21)构成了外层斯塔伯格博弈的纳什均衡。

说明 3　虽然本文的系统模型只有 2 个 ST，但是本文提出的这 2 种博弈策略均可以应用于有 3 个以上 ST 的情形，限于篇幅问题，这里不再详细叙述。

4　算法复杂度分析

本文涉及的算法复杂度包括信令/反馈复杂度以及计算复杂度。

在实际的认知无线电系统中，发送者一般利用复杂度较低的信道训练、估计和反馈机制来获得到相应接收者的信道增益[11]，每个信道增益对应 2 个实数。计算安全速率时，需要获取的信道增益为 h_m、h_{wj}、h_{ir} 以及 h_{ij}，假设系统中有 N 对次用户，则需要 $4N^2+2N+2$ 个实数的反馈开销(如 h_m 由 PR 估计后反馈给 PT，需要 2 个实数的反馈开销；h_{ir} 由 PR 反馈给 ST_i，再进一步反馈给 PT，需要 4 个实数的反馈开销)；类似地，计算 ST 效用函数时，需要 $6N$ 个实数的反馈开销。另外，本文只需局部系统信道增益，所以信令/反馈复杂度可控。

对于计算复杂度而言，本文所提的斯塔伯格策略中 PT 轮流和 N 个 ST 进行斯塔伯格博弈，求出斯塔伯格纳什均衡，选出能够给它提供最大安全速率的 ST 进行合作，因此计算复杂度主要集中在纳什均衡的求解(式(12)和(13))。同理，本文所提的双层博弈策略计算复杂度主要集中在 N 个 ST 的轮流报价(式(18))，因此本文所提 2 种策略的计算复杂度均为 $O(N)$。

综上，本文所提策略的算法复杂度较低，方案可行度较高。

5　仿真实验

考虑一个简单的路径损耗模型，包括一对主用户和两对次用户，任意两节点之间信道的瞬时功率复增益包括路径损耗效应和随机相位[12]，例如 $h_m = d_m^{-\gamma} e^{j\theta} = E[h_m] e^{j\theta}$，其中 d_m 为主用户对之间的距离，γ 为路径损耗因子，$E[h_m] = d_m^{-\gamma}$ 为主链路的平均功率增益，θ 为随机相位，均匀分布在 $[0, 2\pi)$ 内。为便于计算，设置干扰信道的平均功率增益为 $E[h_{ij}] = [h_{ir}] = [h_{ti}] = 0.1$，设置主用户和次用户对之间的平均功率增益为 $E[h_m] = E[h_{si}] = 1$。P^{max} 和噪声功率 σ^2 分别为 10 mW 和 1 mW，c_{si} 设定为 0.3。每个结果都经过 10^5 次实验并进行平均。

假设 PT 和 ST_1 之间的距离为 d_{w1}，将 ST_1 固定在窃听信道平均功率增益 $E[h_{w1}] = d_{w1}^{-\gamma} = 0.5$ 的位置，图 2 显示在本文提出的 2 种策略以及文献[7]提出的固定功率斯塔伯格策略下，主链路的安全速率随着 ST_2 的窃听信道平均功率增益 $E[h_{w2}]$ 的变化情况。从图 2 可以看出：3 种策略都提高了主链路的安全速率；在文献[7]提出的策略作用下，ST 只能在被 PT 选中后决定是否合作，因此没有激发起 ST 之间的竞争，该策略还不允许 PT 和 ST 调整自己的发送功率，错失了部分合作机会，即使合作也不能以最佳功率传输数据，在一定程度上损失了部分性能，因此该策略对主链路安全性能的改善只有 19%；本文提出的斯塔伯格策略允许 PT 和 ST 调整自己的发送功率，促进了它们之间的合作，将安全速率提高了约 63%；双层博弈策略激发了 ST 之间的竞争，进一步增强了主链路的安全性，将安全速率提高了约 68%。

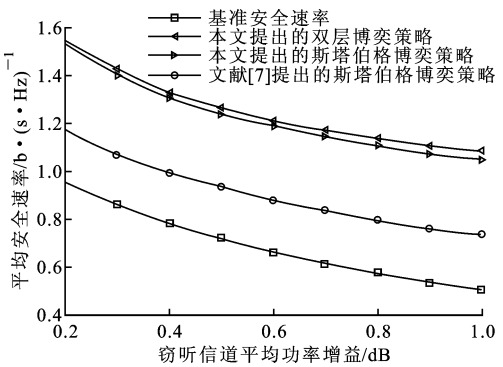

图 2　3 种策略下的平均安全速率随窃听信道平均功率增益的变化情况

图 3 为在上述 3 种策略下 ST 的平均效用函数随着 $E[h_{w2}]$ 的变化情况。从图 3 可以看出：这 3 种策略均能提高 ST 的性能；与文献[7]提出的斯塔伯格策略相比，本文所提出的双层博弈策略和斯塔伯格策略将 ST 的效用函数平均值分别提高了约 190%和 130%。

图 4 为在上述 3 种协作策略下 PT 单独传输的概率随着 $E[h_{w2}]$ 的变化情况。当 PT 没有选中任何一个 ST 进行合作时，它将单独传输数据。从图 4

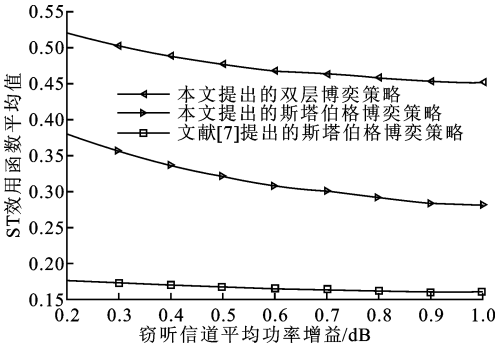

图 3 3 种策略下 ST 效用函数随着窃听信道平均功率增益的变化情况

可以看出：$E[h_{w2}]=0.2$ 时，在双层博弈策略的作用下，ST 接入授权频段的概率高达 71%；在本文和文献[7]所提出的斯塔伯格策略作用下，ST 接入授权频段的概率分别为 56%和 30%，因此双层博弈策略更好地促进了 PT 和 ST 之间的合作，本文提出的斯塔伯格策略次之。

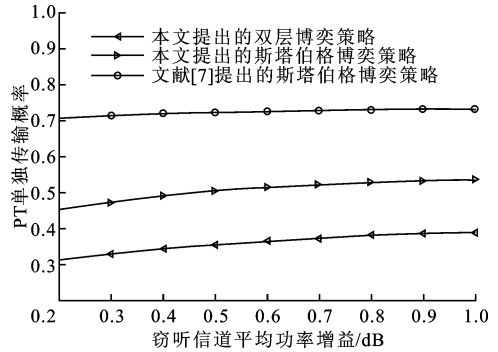

图 4 PT 单独传输概率随着平均功率增益的变化情况

6 小 结

本文采用博弈论研究认知无线电中 PT 和不可信任 ST 之间的合作。首先，通过分析 PT 和 ST 的效用函数性质得出它们之间合作的前提条件，然后为促进它们之间的合作，提出了采用斯塔伯格博弈的策略，并求出了相应的纳什均衡。为进一步激发 ST 的理性和自私性，将上述斯塔伯格策略扩展为双层博弈策略，外层仍采用斯塔伯格模型，内层采用改进的第二价格密封拍卖博弈来模拟次用户之间的竞争，得到了内层拍卖博弈的占优均衡以及外层斯塔伯格博弈的纳什均衡。仿真结果表明，本文提出的 2 种协作策略将主链路的安全速率分别提高了约 63%和 68%，次用户接入授权频段的机会分别为 71%和 56%。

参考文献：

[1] GOLDSMITH A, JAFAR S A, MARIC I, et al. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective [J]. Proceedings of the IEEE Cognitive Radio, 2009, 97(5): 894-914.

[2] 裴庆祺，李红宁，赵弘洋，等. 认知无线电网络安全综述 [J]. 通信学报，2012，34(1)：144-158.
PEI Qingqi, LI Hongning, ZHAO Hongyang, et al. Security in cognitive radio networks [J]. Journal on Communications, 2012, 34(1): 144-158.

[3] KARIM K, EYLEM E. Achieving physical-layer secrecy via friendly jamming with dynamic role assignment for coordinating transmitters [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 434-439.

[4] PHAM S, HAR D, KONG H. Smart power allocation for secrecy transmission in reciprocally cooperative spectrum sharing [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 58(5): 1875-1888.

[5] ZHANG N, LU N, CHENG N, et al. Cooperative spectrum access towards secure information transfer for CRNS [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(11): 2453-2464.

[6] HYOUNGSUK J, STEVEN W M, IL-MIN K, et al. Secure communications with untrusted secondary nodes in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4): 1790-1805.

[7] KARIM K, EYLEM E. Secrecy in cognitive radio networks: turning foes to allies [C]// IEEE International Symposium on Modeling & Optimization in Mobile, Ad Hoc & Wireless Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 194-200.

[8] OSBORNE M J, RUBENSTEIN A. A course in game theory [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1994: 18-30.

[9] 宋婧，丛犁，葛建华，等. 双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法 [J]. 西安交通大学学报，2012，46(10)：89-94.
SONG Jing, CONG Li, GE Jianhua, et al. A dynamic resource allocation approach using cooperative game theory for two-tie networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(10): 89-94.

[10] XIAO L, CHEN T H, LIU J L, et al. Anti-jamming transmission Stackelberg game with observation errors [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 99(4): 1790-1805.

[11] ZHANG R, CUI S, LIANG Y C. On ergodic sum capacity of fading cognitive multiple-access and broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(6): 2066-2075.

[12] GABRY F, ZAPPONE A, THOBABEN R, et al. Energy efficiency analysis of cooperative jamming in cognitive radio networks with secrecy constraints [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 437-440.

[13] STEPHEN B, LIEVEN V. Convex optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 95-103.

[14] CHEN H, LI Y, JIANG Y, et al. Distributed power splitting for swipt in relay interference channels using game theory [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14 (1): 410-420.

附录 A

定理 1 的证明可采用如下定理[13]进行证明。

定理 4　当且仅当下述条件至少一个满足时，连续函数 f 是拟凹函数：①函数 f 是非减的；②函数 f 是非增的；③存在一点 $c\in \mathrm{dom}f$，对于 $t\leqslant c$ 且 $t\in \mathrm{dom}f$，函数 f 非减；对于 $t\geqslant c$ 且 $t\in \mathrm{dom}f$，函数 f 非增。

具体证明过程和文献[14]中定理 1 的证明类似，这里不再详细叙述。

证毕。

附录 B

定理 2 的证明如 2.2 小节所述，当且仅当不等式(7)或者(8)满足时，PT 和 ST 才会进行合作。根据定理 1，当不等式(7)满足时，函数 $R_{\mathrm{s}}^{i}(P_{\mathrm{p}},P_{si})$ 是关于 P_{si} 的拟凹函数，在 $\partial R_{\mathrm{s}}'(P_{\mathrm{p}},P_{si})/\partial P_{si}=0$ 即 $P_{si}=P_{si}(l)$ 时取最大值。因此，当不等式(7)满足时，优化问题(17)的解为 $\min(P_{si}^{\lim},P_{si}(l))$。同理，当不等式(8)满足时，可进行类似的证明。

证毕。

附录 C

定理 3 的证明可以通过分析 ST_v 被选中时 PT 的效用函数 $R_{\mathrm{s}}^{v}(P_{\mathrm{p}},P_{sv})$ 的性质来得到。根据定理 1，当不等式(7)满足时，PT 的效用函数 $R_{\mathrm{s}}^{v}(P_{\mathrm{p}},P_{sv})$ 在区间 $[0,P_{sv}^{\mathrm{bid}}(P_{\mathrm{p}})]$ 和 $[P_{sv}^{\mathrm{bid}}(P_{\mathrm{p}}),P_{sv}^{\lim}]$ 上分别是大于等于 R_{s}^{2} 的单调递增和递减函数，因此在区间 $[P^{\mathrm{SL}}(P_{\mathrm{p}}),P^{\mathrm{SH}}(P_{\mathrm{p}})]$ 上，ST_v 的最佳发送功率是 $P_{sv}^{*}(P_{\mathrm{p}})$，主链路的安全速率 $R_{\mathrm{s}}^{i}(P_{\mathrm{p}},P_{sv}^{*}(P_{\mathrm{p}}))$ 大于等于 R_{s}^{2}，ST_v 的效用函数也取得最大值，两者的性能同时得到了提高；当 $P_{sv}^{*}(P_{\mathrm{p}})>P^{\mathrm{SH}}(P_{\mathrm{p}})$ 或者 $P_{sv}^{*}(P_{\mathrm{p}})<P^{\mathrm{SL}}(P_{\mathrm{p}})$ 时，为保证主链路的安全速率不小于 R_{s}^{2}，胜出 ST_v 的最佳发送功率为 $P^{\mathrm{SL}}(P_{\mathrm{p}})$ 或者 $P^{\mathrm{SH}}(P_{\mathrm{p}})$。当不等式(8)满足时，可以进行类似的证明。

证毕。

[本刊相关文献链接]

陈鹏，邱乐德，王宇. 卫星认知无线电检测门限与功率分配联合优化算法. 2013，47(6)：31-36. [doi：10.7652/xjtuxb201306006]

李晓艳，张海林，郭超平，等. 一种异步的认知无线电网络跳频算法. 2012，46(12)：30-35. [doi：10.7652/xjtuxb201212006]

张正浩，裴昌幸，陈南，等. 宽带认知无线电网络分布式协作压缩频谱感知算法. 2011，45(4)：67-71. [doi：10.7652/xjtuxb201104012]

王天荆，姜华，刘国庆. 采用分组数据的序贯频谱感知方法. 2015，49(12)：34-39. [doi：10.7652/xjtuxb201512006]

王兵，白智全，董培浩，等. 采用空时分组编码的动态分组加权合作频谱感知方案. 2014，48(8)：23-28. [doi：10.7652/xjtuxb201408005]

高锐，李赞，司江勃，等. 一种双重序贯检测的协作频谱感知方法. 2014，48(4)：102-108. [doi：10.7652/xjtuxb201404018]

董恩清，刘伟，宋洋. 采用三角形节点块处理无线传感器网络节点定位中节点翻转歧义的迭代方法. 2015，49(4)：84-90. [doi：10.7652/xjtuxb201504014]

钟艺玲，穆鹏程. 单发多收无线窃听信道中的自适应保密速率传输方案. 2015，49(4)：104-109. [doi：10./xjtuxb201504017]

魏全瑞，刘俊，韩九强. 改进的无线传感器网络无偏距离估计与节点定位算法. 2014，48(6)：1-6. [doi：10.7652/xjtuxb201406001]

蔡文炳，付红双，张水莲，等. 一种无线信道密钥容量求解方法. 2014，48(6)：31-36. [doi：10.7652/xjtuxb201406006]

李建东，姜建，刘鑫一. 采用时延限制和资源预测的异构无线网络选择策略. 2014，48(2)：74-79. [doi：10.7652/xjtuxb201402013]

崔华力，钱德沛，张兴军，等. 用于无线多跳网络视频流传输的优先级机会网络编码. 2013，47(12)：13-18. [doi：10.7652/xjtuxb201312003]

汪志伟，曹建福，郑辑光. 一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议. 2013，47(6)：61-67. [doi：10.7652/xjtuxb201306011]

高昂，李增智，赵季中. 用于无线自组织网络的属性加密算法. 2012，46(8)：33-36. [doi：10.7652/xjtuxb201208006]

李彬，王文杰，殷勤业，等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012，46(6)：1-6. [doi：10.7652/xjtuxb201206001]

（编辑　刘杨）