基于稳定匹配的认知无线网络协作物理层安全机制

冯晓峰,高新波,宗 汝
(西安电子科技大学电子工程学院综合业务网及关键技术国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 在Underlay认知无线网络中,次用户被允许在主用户进行数据发送时接入主用户的频谱.此时,主用户将对次用户和窃听者造成干扰.利用协作干扰技术,主用户产生的干扰可以被用来改善次用户的物理层安全.基于此,本文针对包含多个主次用户的Underlay认知无线网络,提出了一种新的协作物理层安全机制.为了在保证主用户通信质量的前提下,最大化网络中次用户的总的安全容量,该机制将对次用户进行合理的频谱接入选择和功率控制.另外,考虑到个体理性和自私性对于频谱接入稳定性的影响,该机制利用稳定匹配理论将频谱接入选择问题建模为一对一的双边匹配问题,通过构建主次用户之间的稳定匹配来保证频谱接入的稳定性.仿真结果表明,使用本文所提安全机制,可以在保证主用户通信质量的前提下,稳定而又有效地改善网络中次用户获得的总的安全容量.

关键词: 认知无线网络;物理层安全;斯塔克伯格博弈;稳定匹配
中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1095-06
电子学报URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.011

A Stable Matching Based Physical Layer Security Scheme for Cognitive Radio Networks

FENG Xiao-feng, GAO Xin-bo, ZONG Ru
(*State Key Laboratory of Integrated Services Networks, School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi* 710071, *China*)

Abstract: In an underlay cognitive radio network, secondary user (SU) is allowed to access the spectrum when the primary user (PU) is transmitting. At this time, both of SU and eavesdropper will be interfered by PU. Using cooperative jamming technology, the interference produced by PU can be used to improve the physical layer security of SU. Based on this, a novel cooperative physical layer security scheme will be proposed for an underlay cognitive radio network with multiple PUs and SUs. In the proposed scheme, in order to maximize the total security capacity obtained by all SUs under the premise of guarantee of PUs' communication quality, a suitable spectrum access and power control method is designed for SU. Moreover, considering the impact on the access stability of individual rational and selfish, the spectrum access selection problem is formulated as a one-to-one two-side matching. The stability of spectrum access can be guaranteed through building a stable matching between PUs and SUs. The simulation results show that through using the proposed scheme, the communication quality of PU can be guaranteed, and the total secrecy capacity obtained by all SUs can be efficiently improved.

Key words: cognitive radio networks; physical layer security; stackelberg game; stable matching

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术允许未经授权的次用户(Secondary User, SU)机会接入已授权的主用户(Primary User, PU)的频谱资源,被认为是提升频谱效率和解决频谱资源稀缺问题的重要技术手段[1].Underlay模式是认知无线网络中一种常用的频谱接入模式[2].在该接入模式下,SU被允许在PU发送数据的同时接入PU的频谱,此时PU和SU将相互产生干扰.

无线媒介的广播特性决定了利用无线传输的机密

收稿日期:2017-05-09;修回日期:2017-08-03;责任编辑:郭游
基金项目:国家重点研发计划(No. 2016QY01W0204);陕西省重点产业创新链项目-工业领域(No. 2016KTZDGY-02);国家高层次人才特殊支持计划(No. CS31117200001);通信网信息传输与分发技术重点实验室2017基金项目(No. 61421040307)

信息存在被窃听的风险. 这意味着,利用认知无线电网络进行数据传输时,信息同样存在被窃听的风险[3]. 作为加密安全技术的补充和替代,物理层安全(Physical Layer Security, PLS)技术近年来受到越来越多的关注[4]-[7]. 利用物理层安全技术来保障认知无线电网络的通信安全,是目前认知无线网络研究领域中的热点之一.

针对 Underlay 认知无线网络,文献[8]分析了 SU 在多输入单输出(MISO)信道下可以获得的安全容量. 而文献[9]通过合理调 SU 的数据发送来实现用户分集,并以此来改善 SU 的安全容量. 然而,在上述工作中干扰对于物理层安全的提升作用并没有被考虑. 文献[10]-[12]考虑了 Underlay 模式下 SU 和 PU 之间的相互干扰,并利用了此干扰来改善网络的安全性能. 但在上述工作中,都只考虑了包含一个 PU 的简单网络场景.

为此,本文将针对包含多个 PU 和多个 SU 的 Underlay 认知无线网络,提出一种基于稳定匹配的协作物理层安全机制. 该机制充分利用 PU 所产生的干扰,通过对 SU 进行合理地频谱接入选择和功率控制,在保证 PU 通信质量的前提下,有效地改善了网络中 SU 获得的总的安全容量.

2 系统模型和问题描述

首先,考虑如下认知无线网络,其包含了 M 个 PU、N 个 SU 以及一个窃听者. 假定该网络中每个 SU 均想从其源节点 S_S^i 传输机密信息到其对应的目的节点 D_S^i, $i=1,2,\cdots,N$. 假定窃听者 E 是一个被动窃听者,并试图对网络中所有 SU 的信息进行窃听. 网络所有节点都假设只装备了单天线,并且工作在半双工模式.

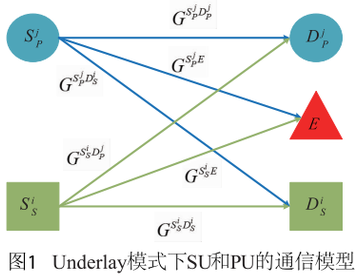

图1 Underlay模式下SU和PU的通信模型

SU 以 Underlay 模式接入 PU 的频谱,且限制每个 SU 至多只能选择接入一个 PU 的频谱,而每个 PU 至多只能允许一个 SU 接入其频谱. 那么,当 SU i 选择接入 PU j 的频谱时,其通信模型如图 1 所示. 在该模型中,SU 、PU 和窃听者 E 同时工作在同一频谱上. 因此 PU 将对 SU 和窃听者 E 产生干扰.

根据安全容量的定义,SU i 可以获得的安全容量如下式所示:

$$C_S^{i,j}(P_S^{i,j})=W^j\left(\log\left(1+\frac{P_S^{i,j}G^{S_S^iD_S^i}}{\sigma^2+P_P^jG^{S_P^jD_S^i}}\right)-\log\left(1+\frac{P_S^{i,j}G^{S_S^iE}}{\sigma^2+P_P^jG^{S_P^jE}}\right)\right)^+ \tag{1}$$

其中,$(x)^+=\max\{0,x\}$,W^j 为 PU j 的频谱带宽,$G^{S_S^iD_S^i}$、$G^{S_S^iD_P^j}$ 和 $G^{S_S^iE}$ 分别为 SU i 的源节点 S_S^i 到其目的节点 D_S^i、PU j 的目的节点 D_P^j 以及窃听节点 E 之间的信道增益,$G^{S_P^jD_S^i}$ 和 $G^{S_P^jE}$ 则为 PU j 的源节点 S_P^j 到 SU i 的目的节点 D_S^i 以及窃听节点 E 之间的信道增益,P_P^j 为 PU j 源节点的平均发送功率,P_S^i 为 SU 的发送功率,σ^2 为链路噪声的方差.

此外,为了便于分析,本文假设对于任意的 SU i,$i=1,2,\cdots,N$,其源节点 S_S^i 到其目的节点 D_S^i 之间的信道增益小于等于其源节点 S_S^i 到窃听节点 E 之间的信道增益,即总有 $G^{S_S^iD_S^i}\leqslant G^{S_S^iE}$. 这意味着,不借助 PU 的协助,SU 可以获得的安全容量为 0.

为了在保证 PU 通信质量的前提下,最大化网络中 SU 获得的总的安全容量,需要对 SU 进行合理地频谱接入选择和功率控制,该问题可以建模为如下全局优化问题:

$$\max_{X,P_S}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}x^{i,j}C_S^{i,j}(P_S^{i,j})$$

$$\text{s.t.}\sum_{i=1}^{N}x^{i,j}P_S^{i,j}G^{S_S^iD_P^j}\leqslant I_{th}^j,\forall j\in\{1,2,\cdots,M\} \tag{a}$$

$$0\leqslant P_S^{i,j}\leqslant P_{\max}^i,\forall i\in\{1,2,\cdots,N\},\forall j\in\{1,\cdots,M\} \tag{b}$$

$$\sum_{i=1}^{N}x^{i,j}\leqslant 1,\sum_{j=1}^{M}x^{i,j}\leqslant 1,\forall i\in\{1,\cdots,N\},\forall j\in\{1,\cdots,M\} \tag{c}$$

$$x^{i,j}\in\{0,1\},\forall i\in\{1,\cdots,N\},\forall j\in\{1,\cdots,M\} \tag{d}$$

(2)

其中,$x^{i,j}=1$ 表示 SU i 选择接入 PU j 的频谱,I_{th}^j 是 PU j 的干扰容限. 条件(a)限制了 SU 对 PU 造成的干扰要低于特定阈值,从而确保 PU 的通信质量;条件(b)则限制了 SU 的发送功率不能超过其最大可用发送功率;条件(c)到(d)限制了每个 SU 至多只能选择接入一个 PU 的频谱,而每个 PU 也至多允许一个 SU 接入其频谱.

通过求解优化问题(2),即可得到频谱接入和功率控制的全局优化结果. 但是,在认知无线电网络中,PU 和 SU 都是理性而又自私的个体,其总是以最大化自身效用为目的. 当个体效用与全局效用相冲突的时候,个体将拒绝接受全局优化结果而选择对自身更有利的结果,从而造成频谱接入的不稳定.

3 基于 Stackelberg 博弈和稳定匹配的方法

本节将 SU 的频谱接入选择问题转化为一对一双

边匹配问题,然后通过求解该匹配问题来获得稳定的频谱接入结果.

3.1 双边稳定匹配

双边匹配问题涉及两方主体,在本文所研究的问题中,这两方主体则分别为 PU 集合和 SU 集合. 设 PU 集合为 $P=\{P_1,P_2,\cdots,P_M\}$,其中 P_j 表示网络中的第 j 个 PU,SU 集合为 $S=\{S_1,S_2,\cdots,S_N\}$,其中 S_i 表示网络中的第 i 个 SU.

定义 1　设 $\mu:P\cup S\rightarrow P\cup S$ 为一一映射,若 $\forall P_j\in P$, $\forall S_i\in S$,满足(1)$\mu(P_j)\in S\cup\phi$;(2)$\mu(S_i)\in P\cup\phi$;(3)$\mu(P_j)=S_i$ 当且仅当 $\mu(S_i)=P_j$,则称 μ 为集合 P 和 S 的一个双边匹配.

令符号 $\succ_i$ 来表示用户 i 对于不同选择的偏好,例如 $j\succ_i j'$ 表示相比于对象 j' 而言,用户 i 更偏好于对象 j.

定义 2　对于给定的一对 PU 和 SU,(P_j,S_i),若匹配 μ 满足(1)$\mu(P_j)\neq S_i$;(2)$P_j\succ_{S_i}\mu(S_i)$;(3)$S_i\succ_{P_j}\mu(P_j)$,则(P_j,S_i)拒绝接受匹配 μ. 如果没有任何一对 PU 和 SU 拒绝接受匹配 μ,则称匹配 μ 为稳定匹配.

3.2 效用函数和 Stackelberg 博弈决策模型

在 Underlay 模式下,SU 接入 PU 的频谱后会对 PU 的通信造成干扰,为了激励 PU 接受 SU 接入自身的频谱,SU 需要为此向 PU 支付一定的费用. 假定 P_j 设定的干扰价格为 C_j^i,则 S_i 的效用函数可以定义如下:

$$U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i)=C_S^{i,j}(P_S^{i,j})-C_j^iP_S^{i,j}G^{S_S^iD_P^j}\tag{3}$$

P_j 允许 S_i 接入自身频谱后,可以根据 S_i 产生的干扰以及自身设定的价格来收取费用,以此获得收益. 因此,P_j 的效用函数定义如下:

$$U_P^{i,j}(C_j^i,P_S^{i,j})=C_j^iP_S^{i,j}G^{S_S^iD_P^j}\tag{4}$$

使用 Stackelberg 博弈 P_j 和 S_i 之间的交互进行描述,令 P_j 作为领导者,而 S_i 作为跟随者. 作为跟随者,当 S_i 得知领导者 P_j 设定的价格后,会选择一个合适的发射功率 $P_S^{i,j}$ 作为其反应策略,以便在保证对 P_j 所产生的干扰低于特定领导者阈值的前提下,最大化自身获得的效用. 因此,其最优反应策略则是通过求解如下优化问题得到的,

$$\max_{P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}}\quad U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i)\tag{5}$$

其中,$\Omega_S^{i,j}=\{P_S^{i,j}\mid 0\leqslant P_S^{i,j}\leqslant\min\{P_{\max}^i,I_{th}^j/G^{S_S^iD_P^j}\}\}$.

S_i 是理性个体,如果对于 $\forall P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}$,总有 $U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i)\leqslant 0$ 成立,那么 S_i 的最优反应决策是,$P_S^{i,j*}=0$. 因此,S_i 的最优反应策略 $P_S^{i,j*}(C_j^i)$ 如下:

$$P_S^{i,j*}(C_j^i)=\begin{cases}\arg\max\limits_{P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}}\ U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i), & \max\limits_{P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}}\ U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i)>0\\ 0, & \text{其它}\end{cases}\tag{6}$$

根据式(1)可知,要保证 $\exists P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}$ 使得 $U_S^{i,j}(P_S^{i,j},C_j^i)>0$,需要满足如下两个条件:

$$G^{S_P^iE}G^{S_S^iD_S^i}>G^{S_S^iE}G^{S_P^iD_S^i},P_P^i>\sigma^2(G^{S_S^iE}-G^{S_S^iD_S^i})/G^{S_P^iE}G^{S_S^iD_S^i}-G^{S_S^iE}G^{S_P^iD_S^i}\tag{7}$$

$$C_j^i\leqslant\max_{P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}}\{C_S^{i,j}(P_S^{i,j})/P_S^{i,j}G^{S_S^iD_P^j}\}\tag{8}$$

作为领导者,P_j 具有优先决策权,并且对 S_i 的反应策略也有充分的了解,在制定决策的过程中会将跟随者 S_i 对自身决策的反应考虑进来. 因此 P_j 将首先对条件(7)进行判定. 如果条件(7)无法得到满足,则此时无论 P_j 设定的干扰价格是多少,S_i 都不会选择接入 P_j 的频谱. 此时,P_j 的最优策略可以选择为 $C_j^{i*}=0$. 如果条件(7)可以得到满足,则 P_j 的最优策略可以通过求解如下优化问题来得到:

$$\max_{C_j^i\in\Omega_P^{i,j}}\quad U_P^{i,j}(C_j^i,P_S^{i,j*}(C_j^i))\tag{9}$$

其中,$\Omega_P^{i,j}=\{C_j^i\mid 0\leqslant C_j^i\leqslant\max_{P_S^{i,j}\in\Omega_S^{i,j}}\{C_S^{i,j}(P_S^{i,j})/P_S^{i,j}G^{S_S^iD_P^j}\}\}$.

因此,P_j 的最优决策 C_j^{i*} 如下所示:

$$C_j^{i*}=\begin{cases}\arg\max\limits_{C_j^i\in\Omega_P^{i,j}}\ U_P^{i,j}(C_j^i,P_S^{i,j*}(C_j^i)),\text{条件(7)得到满足}\\ 0, \quad \text{其它}\end{cases}\tag{10}$$

将 C_j^{i*} 代入到(6)中,可以得到 S_i 对于 C_j^{i*} 的最优反应策略 $P_S^{i,j*}(C_j^{i*})$,此时策略组合 $(C_j^{i*},P_S^{i,j*}(C_j^{i*}))$ 构成了如上定义的 Stackelberg 博弈的均衡策略.

3.3 偏好列表建立和算法实现

对于任意的 $P_j,j\in\{1,\cdots,M\}$,根据式(10)和(4)即可计算得到其允许 SU 接入其频谱后所能获得的效用值列表:

$$[U_P^{1,j}(C_j^{1*}),\cdots,U_P^{2,j}(C_j^{2*}),\cdots,U_P^{N,j}(C_j^{N*})]\tag{11}$$

对如上效用值列表进行降序排序,根据排序结果即可得到 P_j 对于所有 SU 的偏好列表如下所示:

$$[S_{T_j^1},S_{T_j^2},\cdots,S_{T_j^N}]\tag{12}$$

其中,$T_j^t\in\{1,2,\cdots,N\}$, $\forall t\in\{1,2,\cdots,N\}$,并且当 $t_1<t_2$ 时,有 $S_{T_j^{t_1}}\succ_{P_j}S_{T_j^{t_2}}$.

同理,通过类似的方式,对于任意的 $S_i,i\in\{1,\cdots,N\}$,也可以得到其对于 PU 的偏好列表如下所示:

$$[P_{L_i^1},P_{L_i^2},\cdots,P_{L_i^M}]\tag{13}$$

其中,$L_i^l\in\{1,2,\cdots,M\}$, $\forall l\in\{1,2,\cdots,M\}$,并且当 $l_1<l_2$ 时,$P_{L_i^{l_1}}\succ_{S_i}P_{L_i^{l_2}}$.

对于一对一双边匹配问题,当获得所有匹配参与者的偏好列表之后,即可以利用经典的 G-S 算法求解对应的稳定匹配结果,G-S 算法的具体步骤可参考文献[13].

本文所提基于稳定匹配的机制共包含三个部分：博弈均衡计算、偏好列表构建和稳定匹配求解. 在博弈均衡求解部分，使用一维全局搜索算法来寻找均衡解，因此算法时间复杂度为 $O(MNJ)$，其中 M 为 PU 的数量，N 为 SU 的数量，J 为 PU 的可选策略集中元素的总数. 在偏好列表构建部分，涉及两次排序，因此算法时间复杂度为 $O(M\log_2 M + N\log_2 N)$. 最后的稳定匹配求解部分，使用了 G-S 算法，该算法的时间复杂度为 $O(MN)$.

4 仿真结果

为了验证本文所提协作安全机制的性能，进行如下仿真. 考虑一个包含 3 个 PU，$\{P_1, P_2, P_3\}$，3 个 SU，$\{S_1, S_2, S_3\}$ 和一个窃听者 E 的认知无线电网络，其空间位置如图 2 所示. 仿真所涉及的参数进行如下设定：PU 的平均发送功率 $P_P^j = 5\text{mW}$，最大干扰门限 $I_{th}^j = -20\text{dB}$，$j = 1,2,3$；SU 最大可用发送功率 $P_{\max}^i = 30\text{mW}$，$i = 1,2,3$；链路噪声的方差 $\sigma^2 = 10^{-3}\text{mW}$；PU 的频谱带宽 $W = 1\text{Hz}$；考虑一个简单的路径损耗模型，并设传播因子 $\gamma = 2$.

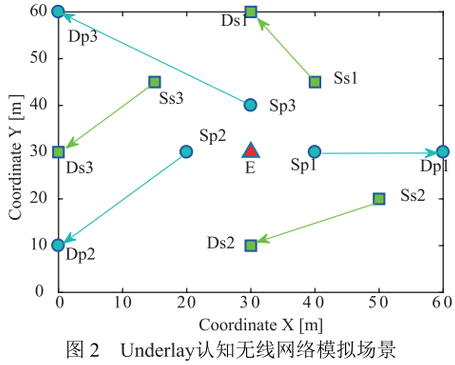

图 2 Underlay认知无线网络模拟场景

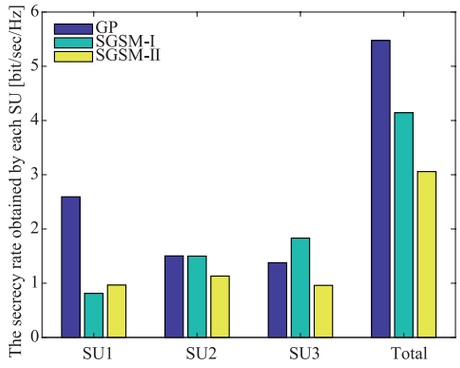

图3 三种模型下SU获得的安全容量对比

为了对比方便，全局优化模型下得到的结果标记为 GP(Global Programing). 稳定匹配模型下得到的结果标记为 SGSM(Stackelberg Game and Stable Matching). 另外，将优于 SU 的情形称为 SGSM-I 型，而优于 PU 的情形称为 SGSM-II 型.

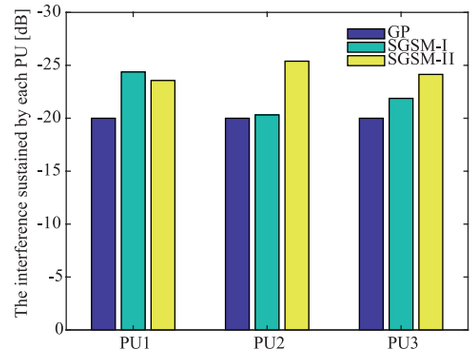

图 4 三种模型下PU受到的干扰程度对比

图 3 和图 4 分别给出了三种模型下 SU 的安全容量和 PU 受到的干扰程度的对比结果. 从结果中可以看出，与两种 SGSM 模型下所得的结果相比，在 GP 模型下每个 SU 获得的安全容量更高，但与此同时每个 PU 都受到了最大干扰. 当 PU 是理性自私的个体时，将会存在 PU 拒绝 SU 接入其频谱的情形，从而导致频谱接入的不稳定.

图 5 给出了三种模型下 SU 可以获得的总安全容量与 PU 允许的干扰门限 I_{th} 的关系曲线图. 从图中可以看出，随着干扰门限 I_{th} 的增大，SU 获得的总的安全容量呈现上升趋势. 当 $I_{th} < -25\text{dB}$ 时，三种模型下 SU 获得总的安全容量基本保持一致，但是当 $I_{th} > -25\text{dB}$ 之后，GP 模型下 SU 的总的安全容量的上升趋势明显快于其它两种模型. 另外，在 SGSM 模型下，随着 I_{th} 的继续增长，SU 的总的安全容量最终趋于平缓，不再增加.

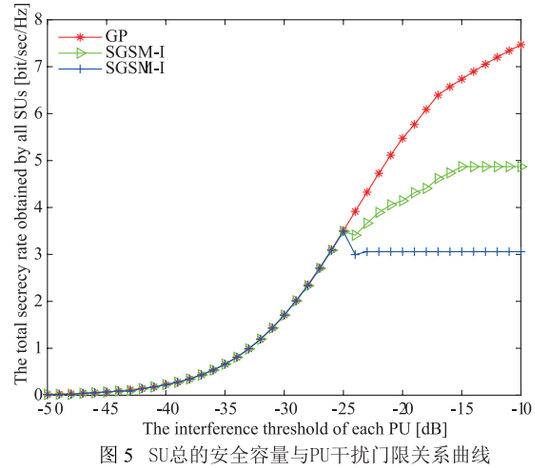

图 5 SU总的安全容量与PU干扰门限关系曲线

图 6 给出了三种模型下 SU 的总的安全容量与 SU 最大可用发送功率 $P_{\max}$ 的关系曲线图. 从图中可以看出，随着 $P_{\max}$ 的增加，三种模型下 SU 获得的总的安全容量随之增加. 在 $P_{\max}$ 较小时，SGSM-I 模型可以取得与

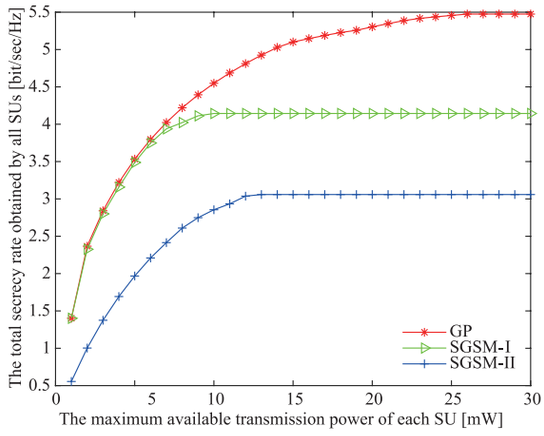

图 6　SU总的安全容量与SU最大发送功率关系曲线

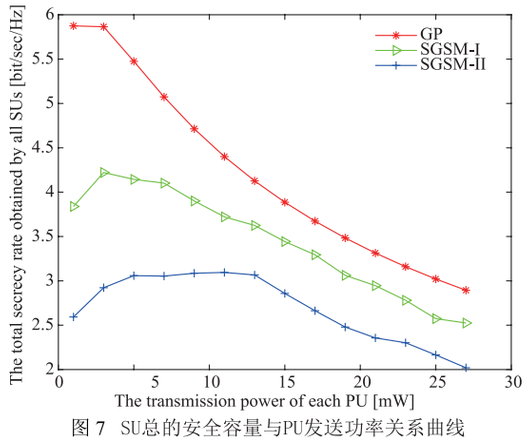

图 7　SU总的安全容量与PU发送功率关系曲线

GP 模型相近的总的安全容量,而 SGSM-II 模型下获得的总的安全容量明显小于前两种. 另外,随着 $P_{\max}$ 的继续增加,SGSM-I 和 SGSM-II 模型下获得的总的安全容量最终趋于平缓,不再继续增加. 图 7 给出了三种模型下 SU 的总的安全容量与 PU 发送功率 P_P 的关系曲线图. 从图中可以看出,除了在 P_P 很小的情况下,三种模型下 SU 获得的总的安全容量有很小的增幅外,当 P_P 不断增加时,三种模型下 SU 获得的总的安全容量都呈现下降趋势,SGSM-II 下降的最快,SGSM-I 次之,GP 最慢.

接下来,我们将本文所提机制应用于包含不同用户数量的情形,以评估更大范围的可行性. 图 8 给出了针对包含不同数量的 SU 和 PU 情形下三种模型的对比结果. 从图中可以看出,随着参与的 SU 和 PU 数量的增加,SU 可以获得的总的安全容量也随之增大. 其中,GP 模型下的增长速度最快,而 SGSM-I 次之,SGSM-II 最慢. 图 9 给出了 GP 模型和 SGSM 模型需要的计算时间与 SU 和 PU 数量之间的关系曲线. 从图中可以看出,相比于 GP 模型,SGSM 模型需要的计算时间稍长,但总体上相差不多,基本保持一致.

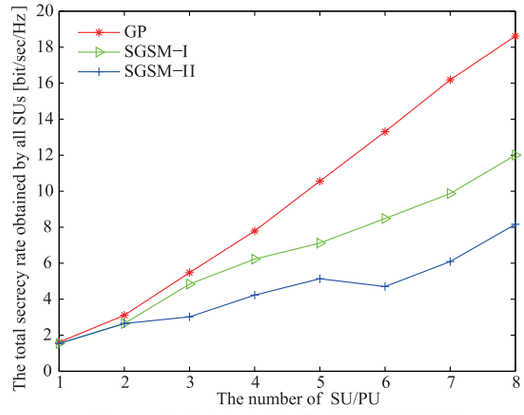

图 8　SU总的安全容量与用户数量关系曲线

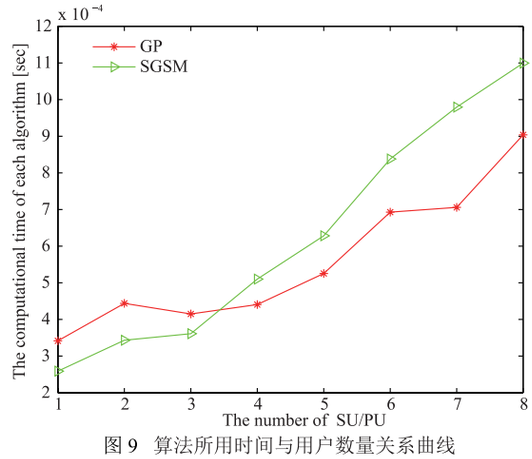

图 9　算法所用时间与用户数量关系曲线

综上可知,与 GP 模型相比,SGSM 模型以性能换取稳定,牺牲了 SU 获得的总的安全容量,但维持了频谱接入的稳定性. 相比之下,SGSM-I 模型在性能和稳定性上取得了较好的折中.

5　结论

本文针对 Underlay 认知无线网络,提出了一种新的协作物理层安全机制. 该机制充分利用 Underlay 接入模式下 PU 对 SU 和窃听者产生的干扰,将 PU 视为 SU 天然的协作干扰节点. 通过对 SU 进行合理地频谱接入选择和功率控制,可以在保证 PU 通信质量的前提下,稳定地提升 SU 获得的安全性能. 仿真结果表明,利用本文所提机制,SU 可以稳定地获得安全性能的提升.

参考文献

[1] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 23(2): 201 – 220.

[2] Khoshkholgh M G, Navaie K, Yanikomeroglu H. Access strategies for spectrum sharing in fading environment: over-

lay, underlay, and mixed[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(12): 1780 – 1793.
[3] Attar A, Tang H, Vasilakos A V, et al. A survey of security challenges in cognitive radio networks: solutions and future research directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(12): 3172 – 3186.
[4] Gopala P K, Lai L, El Gamal H. On the secrecy capacity of fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 54(10): 4687 – 4698.
[5] Dong L, Han Z, Petropulu A P, et al. Improving wireless physical layer security via cooperating relays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1875 – 1888.
[6] Schaefer R F, Boche H. Physical layer service integration in wireless networks: signal processing challenges[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(3): 147 – 156.
[7] 赵耀环, 谢梦非, 尚勇. 物理层安全中的最优中继选择及协同干扰策略[J]. 电子学报, 2015, 43(4): 791 – 794.
Zhao Yao-huan, Xie Meng-fei, Shang Yong. Cooperative jamming with optimal relay selection and power allocation for physical layer security[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(4): 791 – 794. (in Chinese)
[8] Pei Y, Liang Y C, Teh K C, et al. Secure communication in multiantenna cognitive radio networks with imperfect channel state information. [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1683 – 1693.
[9] Zou Y, Wang X, Shen W. Physical-layer security with multiuser scheduling in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 5103 – 5113.
[10] Zhang H, Wang T, Song L, et al. Interference improves PHY security for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2016, 11(3): 609 – 620.
[11] Sibomana L, Tran H, Zepernick H J. On physical layer security for cognitive radio networks with primary user interference[A]. The 34th IEEE Military Communications Conference (Milcom-2015)[C]. Tampa, FL, USA, 2015. 281 – 286.
[12] Wu Y, Liu K J R. An information secrecy game in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2011, 6(3): 831 – 842.
[13] Gale D, Shapley L S. College admissions and the stability of marriage[J]. American Mathematical Monthly, 2013, 120(69): 9 – 15.

作者简介

冯晓峰 男, 1986 年 1 月出生于河南省信阳市, 现为西安电子科技大学电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为认知无线网络、物理层安全.
E-mail: fengxiaofeng1986@163.com

高新波 男, 博士, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者. 1972 年 8 月出生于山东莱芜市, 现任综合业务网理论及关键技术国家重点实验室主任, 西安电子科技大学模式识别与智能系统学科负责人, 科技部重点领域创新团队负责人、教育部创新团队负责人, IET Fellow、CIE Fellow、IEEE 高级会员、中国电子学会青年科学家俱乐部副主席、中国计算机学会理事、中国图象图形学学会常务理事、陕西省图象图形学学会副理事长. 目前主要从事多媒体内容分析、机器学习和模式识别等领域的研究和教学工作.
E-mail: xbgao@mail.xidian.edu.cn

宗 汝 男, 工程师, 1981 年 6 月出生于河南省平顶山市, 现为西安电子科技大学电子工程学院电工电子教学基地教师, 主要研究方向为无线通信、异构无线网络以及博弈论和拍卖理论.
E-mail: zongru@mail.xidian.edu.cn