

考虑恶意节点的CRN合作频谱感知方法

齐小刚¹, 郑圣瑜¹, 刘立芳², 王慧芳¹

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 基于带有恶意节点的更为实际的频谱感知环境, 研究了基于合作感知的频谱共享网络模型, 次级用户将根据合作感知结果动态地调整其发射功率。为了防止恶意节点对感知系统的感知性能造成严重影响, 研究了如何进行合作感知以提高感知性能。在一定的检测概率和相关功率约束下, 建立了一个以最大化次级网络的吞吐量为目标函数的优化问题。仿真实验首先突出说明了恶意节点数目对频谱感知影响重大, 同时还表明无论是否存在恶意节点, 提出的算法均可有效地计算出最优的感知时间和发射功率, 且在降低最大干扰功率限制和最大发射功率限制时, 网络的吞吐量是增大的。

关键词: 认知无线电; 恶意节点; 合作感知; 频谱共享; 功率分配; 凸优化

中图分类号: TN98

文献标识码: A

Cooperative sensing method considering malicious nodes in cognitive radio networks

QI Xiao-gang¹, ZHENG Sheng-yu¹, LIU Li-fang², WANG Hui-fang¹

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on a more practical cognitive radio network with malicious users, the spectrum sharing network model based on the cooperative spectrum sensing was studied that the secondary user can dynamically adjust its transmit power based on cooperative sensing results. To avoid significant reduction in performance of spectrum sensing system caused by malicious nodes, it is aimed to study how to improve the performance of cooperative sensing. By introducing the convex optimization problem, the secondary network throughput is maximized under the certain detection probability conditions and the corresponding power constraints. Simulation results show that whether or not there are malicious nodes, the algorithm is efficient in calculating optimal sensing time and the optimal transmit powers, and the secondary network throughput is increased when the maximum interference power limits and the maximum transmit power restrictions are decreased.

Key words: cognitive radio; malicious node; cooperation sensing; spectrum sharing; power allocation; convex optimization

1 引言

随着无线通信与服务应用的飞速发展, 频谱资源的紧张状况显得日渐突出, 再加上频谱资源的分配是传统的“条块分割”的静态使用政策。来自美国国家无线网络研究试验床(NRNRT)项目的测量

报告表明, 在这种频谱分配政策下, 3 GHz 以下频段的平均频谱利用率仅有 5.2%^[1], 频谱资源存在巨大浪费。针对如何在有限的频谱资源条件下提高频谱利用率, 认知无线电技术^[2]成为了一个关键技术, 它允许非授权用户(SU)在不影响主用户网络服务质量(QoS)的前提下接入授权频带, 实现与授权用

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271165, 61373174); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JZ002, 2015JM6311); 中央高校基本科研业务费基金资助项目(JB140712)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (71271165, 61373174); The Key Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2015JZ002, 2015JM6311); The Central University Basic Scientific Research Funding (JB140712)

户(PU)频谱共享, 提高频谱利用率。

到目前为止, 总共主要有 3 种方法实现频谱共享: 1) 机会频谱接入(OSA)^[3], 此时只有在感知到 PU 不存在的情况下, SU 才能接入已经分配给 PU 的授权频谱; 2) Underlay DSA^[4,5]不同于 OSA, 该方法不需要确定 PU 在与不在, SU 可以与 PU 同时共享频谱资源, 但要求 SU 的发射功率要比较小, 因为需要满足一定的干扰限制条件以保证主用户网络的 QoS; 3) 混合模型^[6], 这个方法是以上 2 个方法的混合运用, 首先通过机会接入模型中的频谱感知确定 PU 是否存在, 然后采用频谱共享模型中的方法, 只不过此时 SU 是依据感知结果调整自己的发射功率, 如果感知结果是 PU 不存在, 则 SU 将以大功率 P_0 发射信号, 否则将以小功率 P_1 发射信号, 以降低对 PU 的干扰。

为了使网络的吞吐量最大化, 选择在混合模型基础上做研究, 同时设定了更符合实际的感知环境, 不但考虑了受阴影效应、信号衰减等因素影响而成为恶意节点的节点, 而且考虑了可能具有主动攻击行为的恶意节点, 称第一类节点为无意的恶意节点, 第二类节点为有意的恶意节点, 这 2 类恶意节点都会导致频谱感知不准确。在这种更为实际的感知环境中, 若采用单点频谱感知, 其效果必定不完整、不精确, 很难达到给定的感知要求。故为了克服恶意节点的干扰, 采用集中式进行合作频谱感知, 此类合作感知有 2 种融合准则: 软准则和硬准则。软准则是指参与合作的感知节点将其原始感知数据报告给融合中心, 然后融合中心对这些数据进行加权等操作得出一个二进制决策。而硬准则是指感知节点直接向 DFC 报告二进制决策 0 或者 1 而非原始感知数据。本文将采用软准则进行判决。

本文的主要工作是在有恶意节点的感知环境以及一定的约束条件下, 建立优化模型, 即在 SU-Tx 处的平均发射功率和 PU-Rx 处的平均干扰功率满足一定的限制以及各个感知节点的检测概率不小于给定的阈值的条件下, 使次级用户网络的吞吐量最大化。通过求解得到了 3 个关键参数: 最优合作感知时间 τ_s^* 以及最优发射功率 P_0^* 和 P_1^* 。

基于合作感知的频谱共享网络模型的时间帧结构如图 1 所示, 假定各节点的时间帧是同步的, 其周期记为 T , T 被分为 3 个时间段: 时长为 τ_s 的

频谱感知阶段、时长为 τ_r 感知结果汇报阶段、时长为 $T - \tau_s - \tau_r$ 的数据传输阶段。在时间 τ_s 内每个感知用户将同时对频谱资源进行感知确认, 得到各自的感知信息; 在时间 τ_r 内各个参与合作的感知节点将通过公共控制信道向数据融合中心(DFC)汇报感知阶段获得到的感知信息; 在时间 $T - \tau_s - \tau_r$ 内 SU-Tx 将依据 DFC 的最终决策动态调整自己的发射功率以进行数据传输。从这个同步的帧结构中可得: 感知时间长, 感知就越精准, 但此时数据传输时间相应变小, 这样单位时间内的吞吐量也减小。所以要寻求合适的感知时间以获得更多的吞吐量, 这就要求合理分配感知时间。文献[7]讨论了在 OSA 模型下, 用单点感知和合作感知方法感知一个频带资源时的感知时间与吞吐量之间的折中问题。文献[8]采用 k -out- N 准则的合作感知进行频谱资源感知, 在考虑感知时间与吞吐量之间的折中问题时, 还考虑了 k -out- N 准则中 k 对吞吐量的影响, 最后得到了能最大化吞吐量的一对最优参数 (τ, k) 。文献[9]考虑了 2 种衰减信道环境下的合作感知问题, 即从总数为 M 的感知节点中选出多少个节点参与合作感知, 各个节点的感知时间为多大才能最大化网络的吞吐量。文献[10]研究合作感知多个频带资源时, 怎样给每一个频带资源分配最佳的感知节点个数以及为每个感知节点设计最优感知时间, 使网络的平均吞吐量最大化。由香农定理可知吞吐量与发射功率相关, 所以 SU-Tx 的发射功率要多大才既能满足相关的功率限制又能使网络的吞吐量最大化, 文献[6]研究了 OSA 与 Underlay DSA 相结合的混合模型(sensing-based spectrum sharing), 并在该模型下建立了以感知时间 τ 与发射功率 P_0, P_1 为变量, 以吞吐量最大化为目标的非凸的非线性优化问题。文献[11]研究了在传统的 OSA 模型中, SU-Tx 单点感知、SU-Tx 与 SU-Rx 合作感知 2 种情况下的功率控制问题。文献[12]研究了基于衰减信道的频谱共享模型, 在 4 种功率限制条件下, 实现 SU 平均吞吐量最大化的最优功率控制问题。文献[13]将一个较宽的频带分为了多个子频带同时分别进行感知, 在相同的平均干扰功率和平均发射功率限制下, 比较了基于频谱共享的宽频带频谱感知(WSSS)模型与基于机会接入的宽频带频谱感知(WOSA)模型的吞吐量, 研究表明 WSSS 模型远比传统模型 WOSA 性能要好。但以上所有关于功率如何分配的研究都是在单点感知的基础上进行的, 而且假设的感知环境

往往都是比较理想,基本上没有考虑到网络的安全性问题,所以本文将研究的环境扩展到带有恶意节点的感知环境,为了克服恶意节点对频谱感知造成的恶劣影响,采用了一种集中式的合作感知方案,同时为了在一定的检测概率和相关功率约束下,使感知方案能达到一个最好合作感知的性能即确保次级网络的吞吐量达到最大,建立了一个最优化模型,其是关于合作感知的感知时间、功率和吞吐量三者之间的平衡优化问题。

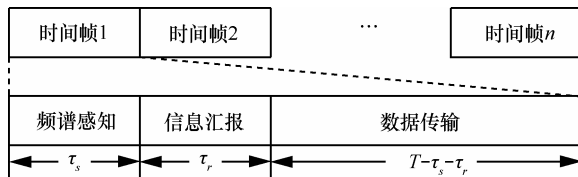


图1 次级用户 SU 的时间帧结构

2 系统模型

本文研究的是带有恶意节点的认知无线网络,其网络系统结构如图2所示,包含主用户网络和次级用户网络(CRN)。其中主用户网络只包含一条由主用户发射机(PU-Tx)和主用户接收机(PU-Rx)构成的主用户链路。CRN中总共有 M 个次级用户,记为 $CR_i, i=1,2,\dots,M$; 这个节点中有 2 个节点是次级用户发射机(SU-Tx)和次级用户接收机(SU-Rx); 以及一个数据融合中心 DFC,负责从这 M 个节点选出 k 个节点来参与合作感知,并通过 k 个正交的公共控制信道从参与协作感知的个节点(包括 k_H 个诚实节点和 k_M 个恶意节点)那里收集感知信息,然后根据这些信息做出最终判定。其中诚实节点将如实地向 DFC 报告自己的感知信息。因在实际感知环境当中,可能存在一些想独享有限频谱资源的自私恶意感知节点,即当主用户不存在时,该节点因想独享空闲频谱,所以会向数据融合中心汇报一个较高的能量值,以误导 DFC 认为主用户是存在的,这样该恶意节点就可以达到一人独享频谱资源的目的。所以这里假定恶意节点采用一种简单的基于终端的频谱感知数据篡改(T-SSDF)攻击策略—FA 攻击模式^[14]进行汇报,当检测到主用户占用信道时,攻击节点正常如诚实节点一样汇报主用户占用信道;而当检测到主用户不占用信道时,攻击节点依旧汇报主用户占用着信道。由于本文是基于集中式的网络模型且采用的是能量检测的频谱感知方

法,所以此时的 FA 攻击模式具体来说就是当其感知到的信号能量统计量的值大于攻击阈值 η , 则不发动攻击,即如实地报告自己的感知结果;否则将以概率 p_a 发动攻击,即向 DFC 发送一个较高的能量值以达到恶意攻击的目的,从而导致整个网络的虚警概率的增加,引起数据融合中心 DFC 做出错误的频谱感知判决,降低了频谱感知性能。另外,假定网络中只有一个频带资源,即主、次用户链路共用一个频带资源,网络中 PU-Tx 到 CR_i 、SU-Tx 到 SU-Rx、SU-Tx 到 SU-Rx 链路的衰减系数分别记为 h_i, g_{ss}, g_{sp} 。假定这些信道都是平稳衰减的,且信道功率增益假定是遍历的、平稳的,而且还是为次级用户 CR_i 所知^[6,15,16]。

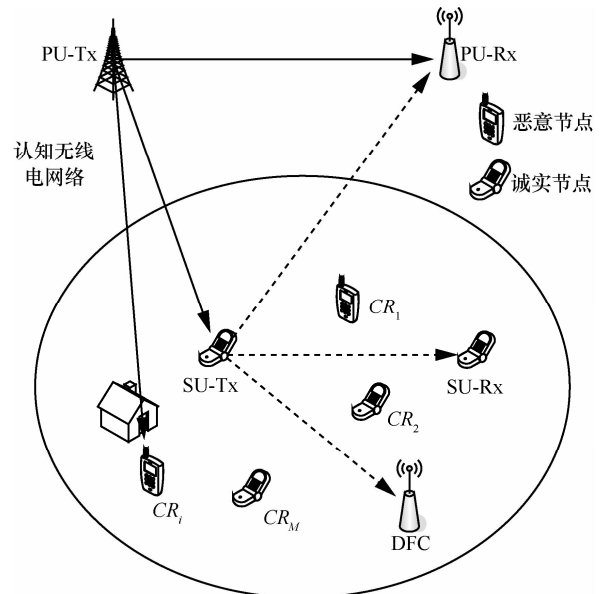


图2 带有恶意节点的认知无线网络的网络结构

2.1 能量检测

首先讨论单点频谱感知问题,该问题是一个二元假设检验问题。 H_0 表示频带资源处于闲状态, H_1 表示频带资源处于忙状态,在这 2 种假设条件下 CR_i 处接收到的信号可表示如下

$$y_i(n) = \begin{cases} u_i(n), & H_0 \\ h_i s(n) + u_i(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $s(n), n=1,2,\dots,N$ 是主用户 PU-Tx 所发射的复 PSK 信号,并假定其是均值为 0, 方差为 σ_s^2 的随机变量; $u_i(n)$ 表示 CR_i 处的加性高斯白噪声信号,并假设其满足均值为 0, 方差为 σ_u^2 的循环对称复杂的高斯分布,即 $u_i(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_u^2)$ 。且变量 $s(n)$

与 $u_i(n)$ 之间是相互独立的，所有 $u_i(n)$ 变量之间也是相互独立的。 h_i 是 PU-Tx 与每个感知节点 CR_i 之间的信道衰减系数，并假定其是均值为 0，方差为 1 的复高斯随机变量，所以每个感知节点处的瞬时信噪比 $\gamma_i = \frac{|h_i|^2 \sigma_s^2}{\sigma_u^2}$ 。还假定每个感知节点可以通过一组正交的控制信道将瞬时信噪比 γ_i 反馈给 DFC，即 DFC 知道所有 γ_i 的具体参数值。

根据能量检测原理，每个感知节点 CR_i 处的信号能量的统计量可由式(2)表示。

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_i(n)|^2 \quad (2)$$

其中， $N = \tau_s f_s$ 是一个感知周期内的感知节点的采样总数。当采样数 N 足够大时，由中心极限定理可知统计量 V_i 是近似服从以下高斯分布的^[7]。

$$V_i \sim \begin{cases} N(\sigma_u^2, \frac{1}{N} \sigma_u^4), & H_0 \\ N(\sigma_u^2(1 + \gamma_i), \frac{1}{N} \sigma_u^4(1 + 2\gamma_i)), & H_1 \end{cases}$$

所以各个感知节点 CR_i 处的检测概率与虚警概率分别为

$$P_{di}(\tau_s, \varepsilon_i) = Q\left(\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_u^2} - \gamma_i - 1\right) \sqrt{\frac{\tau_s f_s}{2\gamma_i + 1}}\right) \quad (3)$$

$$P_{fi}(\tau_s, \varepsilon_i) = Q\left(\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_u^2} - 1\right) \sqrt{\tau_s f_s}\right) \quad (4)$$

其中， ε_i 是感知节点 CR_i 的能量检测阈值， $Q(\cdot)$ 是标准正态分布的互补累积函数。消去能量阈值参数 ε_i 可以得到检测概率与虚警概率之间的关系表达式如下

$$P_{fi}(\tau_s, \varepsilon_i) = Q\left(\frac{\sqrt{2\gamma_i + 1}}{Q(P_{di})} + \gamma_i \sqrt{\tau_s f_s}\right) \quad (5)$$

2.2 数据融合

在数据融合阶段，融合规则如图 3 所示，首先各个感知节点通过正交控制信道把各自的信噪比信息发给数据融合中心 DFC，然后 DFC 依据收到的信噪比选出 k 个节点与 SU-Tx 一起进行合作频谱感知，如何选取 k 的值可以参考文献[9]。为了防止处于阴影效应下节点(即上文提到的客观存在的无意的恶意节点)对 DFC 决策造成影响，DFC 将选取信噪比最大的 k 个节点参与合作感知，但选出的 k 个节点仍然可能存在 k_M 个有意的恶意节点，本文没有提出专门的检测技术进行检测，而是通过加权的

方法降低恶意节点对 DFC 做出最终决策的干扰。然后参与合作感知的各个节点基于正交公共控制信道向 DFC 汇报感知结果，由于考虑的是关于感知时间的最优化问题，与报告时间无关，故假设每个节点可以在一个很短的固定的时间 τ_r 内同步地向 DFC 传输报告，即认定假定报告时间 τ_r 是一个趋于零的常数。如果第 i 个感知节点 CR_i 是诚实节点，则其通过第 i 个正交公共控制信道向 DFC 报告的内容 U_i 就是感知结果 V_i ，即 $U_i = V_i$ 。由于考虑的攻击模式是 FA 攻击^[14]模式，所以倘若节点 CR_i 是恶意节点，而且节点 CR_i 感知结果 $V_i > \eta$ ，则不发动攻击，将如实报告自己的感知结果 $U_i = V_i$ ；否则将以概率 p_a 发动攻击，即向 DFC 发送报告 $U_i = V_i + \Delta$ 。综合上述几种情况得到 U_i 的表达式为

$$U_i = \begin{cases} V_i, & i \in K_H \\ V_i, & i \in K_M \text{ 且 } V_i \geq \eta \\ V_i + \Delta, & i \in K_M \text{ 且 } V_i < \eta \end{cases} \quad (6)$$

其中， K_H 是诚实节点的集合， K_M 是恶意节点的集合， η, p_a, Δ 是 FA 攻击模式的攻击参数，分别为攻击阈值、攻击概率和攻击强度。

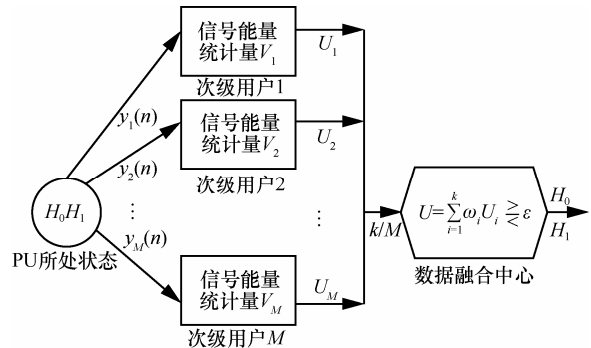


图 3 合作频谱感知的判决准则

最后 DFC 将根据各个节点的信噪比 γ_i 为每一个参与合作感知的次级用户 $CR_i, i=1, \dots, k$ 设计一个权重 $\omega_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \gamma_i^2}}$ ，故 DFC 得到关于信号能量的统计量 $U = \sum_{i=1}^k \omega_i U_i$ 。

为了简化问题，假定攻击阈值与能量检测的阈值是同一个值即 $\eta = \varepsilon$ ， U_i 可重写为

(A) 当 PU 的实际状态为 H_0 时：

$$U = \sum_{i=1}^k \omega_i U_i = \sum_{i=1}^k \omega_i V_i + C_0 \quad (7)$$

(B) 当 PU 的实际状态为 H_1 时:

$$U = \sum_{i=1}^k \omega_i U_i = \sum_{i=1}^k \omega_i V_i + C_1 \quad (8)$$

其中, $C_0 = p_a \Delta \sum_{i=1}^{k_M} \omega'_i (1 - P_{fi})$, $C_1 = p_a \Delta \sum_{i=1}^{k_M} \omega'_i (1 - P_{di})$ 。

C_0, C_1 均是与随机变量 V_i 无关的常量。

随机变量 V_i 服从高斯分布, C_i 是常量, 故 $U = V + C_i, i \in \{0, 1\}$ 也服从高斯分布, 由此可得

$$U \sim \begin{cases} N(\sigma_u^2 \sum_{i=1}^k \omega_i + C_0, \frac{1}{N} \sigma_u^4), & H_0 \\ N(\sigma_u^2 \sum_{i=1}^k \omega_i (1 + \gamma_i) + C_1, \frac{1}{N} \sigma_u^4 \sum_{i=1}^k \omega_i^2 (1 + 2\gamma_i)), & H_1 \end{cases}$$

如果选定能量阈值为 ε , 则 DFC 处的检测概率和虚警概率分别表示如下

$$P_d(\tau_s, \varepsilon) = Q\left(\frac{\varepsilon - \sigma_u^2 \sum_{i=1}^k \omega_i (1 + \gamma_i) - C_1}{\sigma_u^2 \sqrt{\sum_{i=1}^k \omega_i^2 (1 + 2\gamma_i)}} \sqrt{\tau_s f_s}\right) \quad (9)$$

$$P_f(\tau_s, \varepsilon) = Q\left(\frac{\varepsilon - \sigma_u^2 \sum_{i=1}^k \omega_i - C_0}{\sigma_u^2} \sqrt{\tau_s f_s}\right) \quad (10)$$

消去未知参数 ε 可以得到 P_f 与 P_d, P_{di}, P_{fi} 间关系表达式如下

$$P_f = Q\left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k \omega_i^2 (1 + 2\gamma_i)}}{Q(P_d)} + \sqrt{\tau_s f_s} \left(\sum_{i=1}^k \omega_i \gamma_i + \frac{C_1 - C_0}{\sigma_u^2}\right)\right)$$

3 问题公式化及求解

P_f 基于合作感知的频谱共享模型的帧结构如图 1 所示, 每个时间帧被划分为 3 个时间段: 频谱感知、数据汇报和数据传输。用 T 表示一个帧的周期, 为感知时间, τ_r 为感知节点向 DFC 报告感知结果的时间, 剩下的 $T - \tau_s - \tau_r$ 是 SU-Tx 的数据传输时间。 P_0 在数据传输开始阶段, SU-Tx 依据 DFC 的决策结果调整自己的信号发射功率, 如果检测到 PU 处于闲状态, 则它将以大功率发射信号; 如果 PU 是处于忙状态, SU-Tx 将以小功率发射信号。

表 1 中 $P(H_0)$ 、 $P(H_1)$ 分别表示 PU 处于闲和忙的概率, $r_{ij} (i, j \in \{0, 1\})$ 表示这 4 种情况下 SU-Tx 的对应瞬时数据传输速率, 具体表达式如下

$$r_{00} = \text{lb}\left(1 + \frac{g_{ss} P_0}{\sigma_u^2}\right), r_{01} = \text{lb}\left(1 + \frac{g_{ss} P_1}{\sigma_u^2}\right)$$

$$r_{10} = \text{lb}\left(1 + \frac{g_{ss} P_0}{h_k P_p + \sigma_u^2}\right), r_{11} = \text{lb}\left(1 + \frac{g_{ss} P_1}{h_k P_p + \sigma_u^2}\right)$$

表 1 4 种可能情况说明

PU 状态	最终决策	对应情况的发生概率	功率	速率
闲	H_0	$(1 - P_f)P(H_0)$	P_0	r_{00}
闲	H_1	$P_f P(H_0)$	P_1	r_{01}
忙	H_0	$(1 - P_d)P(H_1)$	P_0	r_{10}
忙	H_1	$P_d P(H_1)$	P_1	r_{11}

其中, g_{ss} , h_k 分别表示 SU-Tx 与 SU-Rx 之间、PU-Tx 与 SU-Tx 之间的信道衰减系数; P_p 是 PU-Tx 的信号发射功率, 假定是一个常值。则由表 1 可以看出, 基于合作感知频的谱共享模型的网络的平均吞吐量可写成如下形式。

$$R = E\left\{\frac{T - \tau_s}{T} (\alpha_0 r_{00} + \alpha_1 r_{01} + \beta_0 r_{10} + \beta_1 r_{11})\right\} \quad (11)$$

其中, $E\{\}$ 表示对随机变量取期望, $\alpha_0 = (1 - P_f)P(H_0)$, $\alpha_1 = P_f P(H_0)$, $\beta_0 = (1 - P_d)P(H_1)$, $\beta_1 = P_d P(H_1)$ 。 $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 分别表示主用户 PU 实际处于闲状态与忙状态的概率。

函数表达式(11)是需要求解的最优化问题的目标函数, 它是关于感知时间 τ_s 、能量阈值 ε 、 $\{\varepsilon_i\}$ 以及发射功率 P_0 、 P_1 这 5 个变量的函数表达式。接下来将结合具体实际感知环境进一步提出关于该目标优化函数的相关约束条件。

首先, 假定次级网络的能量是有限的, 为了保证次级用户网络能长时间工作, 如文献[17]一样对次级用户的发射功率进行了限制, 保证次级用户网络的平均发射功率低于限定值

$$E\{\alpha_0 P_0 + \alpha_1 P_1 + \beta_0 P_0 + \beta_1 P_1\} \leq P_{av} \quad (12)$$

其中, P_{av} 是 SU-Tx 的最大平均发射功率, 这里的平均是指信道衰减系数 h_i, g_{ss}, g_{sp} 等随机变量的期望。

由于认知无线网络的首要任务是保护主用户网络的服务质量(QoS), 故对网络的干扰功率进行了限制。如同发射功率限制一般, 采用的干扰功率限制也是平均的。根据基于合作感知的频谱共享网络模型, 干扰只在 PU 处于忙状态时发生。所以平均干扰功率约束可以写成如下形式。

$$E\{g_{sp}(\beta_0 P_0 + \beta_1 P_1)\} \leq Q_{av} \quad (13)$$

其中, g_{sp} 是 SU-Tx 与 PU-Rx 通信信道之间的功率增益系数, Q_{av} 是主用户 PU-Rx 所能忍受的最大平均干扰功率。

最后, 为了保证次级网络的服务质量(QoS), 确保各个节点处的检测概率和网络的整体检测概率分别不低于各自的目标检测概率, 这是因为恶意节点也参与了频谱合作感知, 同时假定其攻击阈值就是能量检测的能量阈值, 本文关于检测概率的限制条件如下

$$P_d \geq P_{th}, P_{di} \geq p_{th}, i=1, 2, \dots, k \quad (14)$$

在上述限制条件下, 最大化次级网络的平均吞吐量的最优化问题为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\tau_s, \epsilon, \{e_i\}, P_0, P_1\}} R \\ & \text{subject to} \quad (12), (13), (14), P_0 \geq 0, P_1 \geq 0 \quad (P1) \\ & \quad \quad \quad 0 \leq \tau_s \leq T \end{aligned}$$

由 P1 可知, 最大化吞吐量与能量检测的阈值也有关, 如文献[7]的证明一样, 可得当且仅当约束条件(14)中各不等式约束均取等号时, P1 得到最优解。故 P1 可简写形式如下

$$\begin{aligned} & \max_{\{\tau_s, P_0, P_1\}} R \\ & \text{subject to} \quad (12), (13), P_0 \geq 0, P_1 \geq 0 \quad (P2) \\ & \quad \quad \quad 0 \leq \tau_s \leq T \end{aligned}$$

可以验证 P1 是关于发射功率 P_0, P_1 是凸优化问题^[13], 但对感知时间 τ_s 是非凸的^[7], 故求解最优感知时间不能使用凸优化方法。但考虑到实际感知时间是限制在时间区间 $(0, T)$ 之内的, 故采用一维精确搜索的数值计算方法求解最优感知时间。下面主要求解使次级网络平均吞吐量最大化的发射功率。关于发射功率 P_0 和 P_1 的拉格朗日函数如下

$$\begin{aligned} L(P_0, P_1, \lambda, \mu) = & E\left\{\frac{T - \bar{\tau}_s}{T} [\alpha_0 r_{00} + \alpha_1 r_{01} + \beta_0 r_{10} + \beta_1 r_{11}]\right\} - \\ & \lambda [E\{\alpha_0 P_0 + \alpha_1 P_1 + \beta_0 P_0 + \beta_1 P_1\} - P_{av}] - \\ & \mu [E\{g_{sp}(\beta_0 P_0 + \beta_1 P_1)\} - Q_{av}] \end{aligned}$$

所以 P2 的拉格朗日对偶优化问题为

$$\minimize_{\lambda \geq 0, \mu \geq 0} g(\lambda, \mu) \quad (P3)$$

其中, $g(\lambda, \mu) = \sup_{P_0, P_1} L(P_0, P_1, \lambda, \mu)$ 表示拉格朗日对偶函数。文献[13]证明了 P2 与 P3 最优值的差值为零, 这说明关于发射功率优化问题 P2 与其拉格

朗日对偶优化问题 P3 之间是等价的, 故只需求 P3 的最优解即可。但该问题现在是一个关于双变量 P_0, P_1 的联合规划问题, 为此将其分解成 2 个子优化问题

$$\begin{aligned} \text{SP1:} \quad & \maximize_{P_0 \geq 0} E\left\{\frac{T - \bar{\tau}_s}{T} (\alpha_0 r_{00} + \beta_0 r_{10}) - \lambda(\alpha_0 P_0 + \beta_0 P_0) - \mu g_{sp} \beta_0 P_0\right\} \\ \text{SP2:} \quad & \maximize_{P_1 \geq 0} E\left\{\frac{T - \bar{\tau}_s}{T} (\alpha_1 r_{11} + \beta_1 r_{01}) - \lambda(\alpha_1 P_1 + \beta_1 P_1) - \mu g_{sp} \beta_1 P_1\right\} \end{aligned}$$

显然可以看出 SP1 和 SP2 分别是关于 P_0, P_1 的无约束凸优化问题, 运用拉格朗日函数以及 KKT 条件, 得到当检测到主用户处于闲状态时 SU-Tx 的最优发射功率

$$P_0 = \left[\frac{A_0 + \sqrt{A_0}}{2} \right]^+ \quad (15)$$

其中, $A_0 = \frac{\text{lb}(e)(\alpha_0 + \beta_0)}{\lambda(\alpha_0 + \beta_0) + \mu\beta_0 g_{sp}} - \frac{2\sigma_u^2 + h_k P_p}{g_{ss}}$

$$A_0 = A_0^2 - \frac{4}{g_{ss}} \left\{ \frac{\sigma_u^4 + \sigma_u^2 h_k P_p}{g_{ss}} - \frac{\text{lb}(e)[\alpha_0(\sigma_u^2 + h_k P_p) + \beta_0 \sigma_u^2]}{\lambda(\alpha_0 + \beta_0) + \mu\beta_0 g_{sp}} \right\}$$

当检测到主用户处于忙状态时, SU-Tx 的最优发射功率为

$$P_1 = \left[\frac{A_1 + \sqrt{A_1}}{2} \right]^+ \quad (16)$$

其中, $A_1 = \frac{\text{lb}(e)(\alpha_1 + \beta_1)}{\lambda(\alpha_1 + \beta_1) + \mu\beta_1 g_{sp}} - \frac{2\sigma_u^2 + h_k P_p}{g_{ss}}$

$$A_1 = A_1^2 - \frac{4}{g_{ss}} \left\{ \frac{\sigma_u^4 + \sigma_u^2 h_k P_p}{g_{ss}} - \frac{\text{lb}(e)[\alpha_1(\sigma_u^2 + h_k P_p) + \beta_1 \sigma_u^2]}{\lambda(\alpha_1 + \beta_1) + \mu\beta_1 g_{sp}} \right\}$$

其中, $[x]^+ = \max\{0, x\}$; $\lambda \geq 0$, $\mu \geq 0$ 是式(13)、式(14)的拉格朗日乘子, 可通过椭球方法^[18]进行求解。

综合上述求解方法, 可以得到求解优化问题 P3 的具体算法如下所示。

算法 1 基于频谱感知的频谱共享 CRN 中的最优感知时间与最优发射功率的求解算法

For $\tau_s = 0:T$

1) 初始化 $\lambda_k, \mu_k, k=1$

2) 重复循环计算 P_0, P_1 , 并按下式更新乘子 λ, μ 和迭代次数 k

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \zeta(P_{av} - E\{\alpha_0 P_0 + \alpha_1 P_1 + \beta_0 P_0 + \beta_1 P_1\})$$

$$\mu_{k+1} = \mu_k + \zeta(Q_{av} - E\{g_{sp}(\beta_0 P_0 + \beta_1 P_1)\})$$

$$k = k + 1$$

直到 $|\lambda_{k+1} - \lambda_k| < \delta$ 且 $|\mu_{k+1} - \mu_k| < \delta$ 。

End

得到最优解: $\tau_s^* = \arg \max R(\tau_s, P_0, P_1)$

$$[P_0^*, P_1^*] = [P_0, P_1]_{\tau_s = \tau_s^*}$$

其中, ζ 、 δ 分别是迭代步长和迭代精度。

4 仿真分析

此部分主要包括 2 部分内容: 首先分析了恶意节点数量对合作频谱感知的影响, 如图 4 和图 5 所示; 其次着重讨论了当网络中共有 $k=10$ 个节点参与合作感知, 恶意节点的个数占合作感知节点总数的 10% 即 $k_M=1$ 时, 次级网络中吞吐量随 3 个约束变量(感知时间 τ_s , 平均最大发射功率 P_{av} , 平均最大干扰功率 Q_{av})变化而变化的仿真结果, 如图 6~图 8 所示。假定具备 FA 攻击模式^[14]的恶意节点的攻击阈值 $\eta = \varepsilon$ 、攻击概率 $p_a = 0.2$ 、攻击强度 $\Delta = 0.5\varepsilon$ 。PU 处于闲状态的概率 $P(H_0) = 0.6$, 处于忙状态的概率 $P(H_1) = 0.4$ 。每个帧的周期 $T = 100$ ms, 每个节点感知时的采样频率 $f_s = 6$ MHz。DFC 处的目标检测概率 $P_d = 99.99\%$, 各个感知节点处的目标检测概率 $P_{di} = 90\%$ 。假设次级网络离主用户网络很远, 所以各个感知节点的 SNR 可以近似为同一个值 $\gamma = -17$ dB。最后假定主用户 PU 的发射功率 $P_p = 10$ dB, 噪声信号的方差 $\sigma_u = 1$ 。

图 4 是在信噪比 $\gamma = -20$ dB, 平均干扰功率限制 $Q_{av} = -10$ dB, 平均发射功率限制 $P_{av} = 10$ dB 条件下, 在参与合作感知节点总数 $k = 60$, 恶意节点个数 k_M 分别为 0、3、6、9 时, 合作感知的全局虚警概率随感知时间的变化。从图中可以看出, 当恶意节点个数较小时, 任何时间下的全局虚警概率均是小于 1/2 且随感知时间的增加, 全局虚警概率而不断的递减趋于 0, 这说明合作频谱感知可以有效地抵御恶意节点带来的伤害; 但是当恶意节点数目较多时, 全局虚警概率随感知时间的增加是先单调递减至某一个最小值, 但之后会反弹单调递增至 1, 这说明恶意节点数目越多, 越能在较短的感知时间能误导 DFC 做出错误的判决, 使 DFC 的虚警概率接近于 1。

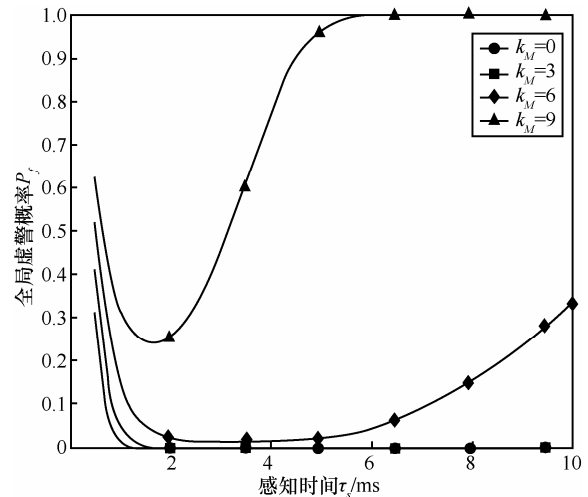


图 4 在带有不同个数恶意节点的次级网络中, 全局虚警概率随感知时间的变化

如图 5 所示, 在 4 种不同的最大平均干扰功率限制下, 带有恶意节点的次级网络和不带恶意节点的次级网络的最大平均吞吐量随最大平均发射功率的变化关系。此时各感知节点的信噪比 $\gamma = -20$ dB, 平均干扰功率限制 $Q_{av} = -10$ dB, 参与合作感知节点总数 $k = 60$ 。从图中可以看出, 最大平均吞吐量在 4 种情况下随着恶意节点个数的增加大体上是先保持某一较大值, 然后进入较为明显的递减阶段, 之后基本上又稳定在某个最小值附近。这说明当恶意节点的比例在 10% 以下, 合作频谱感知还是没有收到恶意节点的太大影响, 即当恶意节点数目较小时, 合作频谱感知可以有效抵御恶意节点带来的伤害; 但当恶意节点的比例在 10% 以上甚至更高时, 最大平均吞吐量明显开始下滑, 同时由于采取的网络模型是混合式的频谱共享模型, 所以

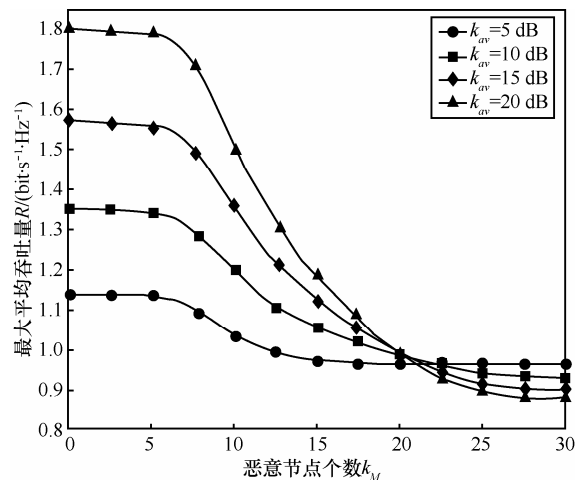


图 5 在 4 种不同的最大平均发射功率限制下, 次级网络的最大平均吞吐量随恶意节点个数的变化关系

尽管当恶意节点个数较多时，虚警概率是趋于 1，但最大平均吞吐量不为 0，而是趋于某一固定的最小值。

如图 6 所示，在 3 个不同的最大平均发射功率限制下，带有恶意节点的次级网络和不带恶意节点的次级网络的平均吞吐量随感知时间的变化关系。这里均假定平均最大干扰功率 $Q_{av} = -10$ dB。从图中可以清楚地看出无论是带恶意节点还是不带恶意节点的次级网络其吞吐量都是先随感知时间 τ_s 的增加而增加到最大值，之后就是随感知时间的增加而减小，即吞吐量是关于变量 τ_s 的凸函数。当无恶意节点时，最优的感知时间 τ_s^* 基本上都是在 2 ms 左右；而当有恶意节点时，最优的感知时间 τ_s^* 基本上都是在 5 ms 左右。而且当有恶意节点参与到合作频谱感知时次级网络的最大平均吞吐量是明显低于不带恶意节点的合作感知时的最大平均吞吐量的。这是因为恶意节点的干扰攻击导致了虚警概率升高，从而降低了系统的吞吐量，同时还可以看出，恶意节点带来的危害是很明显的，所以如何检验出某节点是恶意节点将是今后的一个研究方向。另外可以看到当感知时间 τ_s 足够大时，此时次级网络的平均吞吐量是一样大的，这就表明，当感知时间足够长时，恶意节点几乎不造成任何影响，这就相当于说某种程度上合作感知能有效防止恶意节点的攻击，此时感知足够精准。

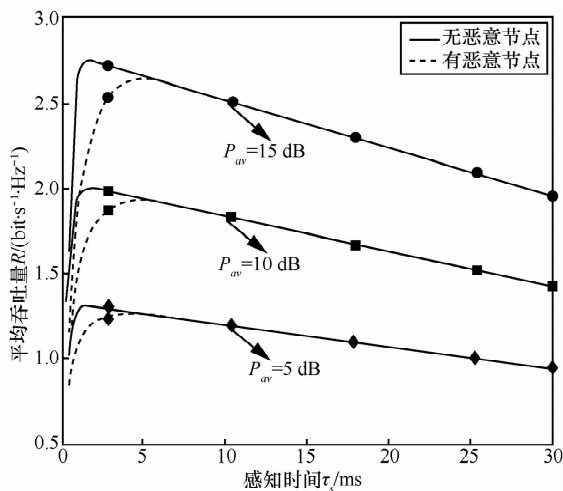


图 6 在 3 种不同的最大平均发射功率限制下，带有恶意节点的次级网络和不带恶意节点的次级网络的平均吞吐量随感知时间的变化关系

如图 7 所示，在 3 种不同的最大平均干扰功率限制下，带有恶意节点的次级网络和不带恶意节点的次级网络的最大平均吞吐量随最大平均发射功率

率的变化关系。图中纵坐标表示的是各种情况下的最大平均吞吐量，可以看出当 Q_{av} 为一定值时，最大平均吞吐量随平均发射功率 P_{av} 增加而增加，且基本上是呈线性增长；当 P_{av} 为一定值，平均干扰功率 Q_{av} 从 -15 dB 增加至 -5 dB 时，最大平均吞吐量还是随 Q_{av} 的增加而增加的，但其增加的幅度显然不比随 Q_{av} 的增加而增加的幅度大。而且在 3 种平均干扰功率限制情形下，无恶意节点的次级网络的平均最大吞吐量是一直大于有恶意节点的次级网络的，这个与图 6 中所描述的情况一致。

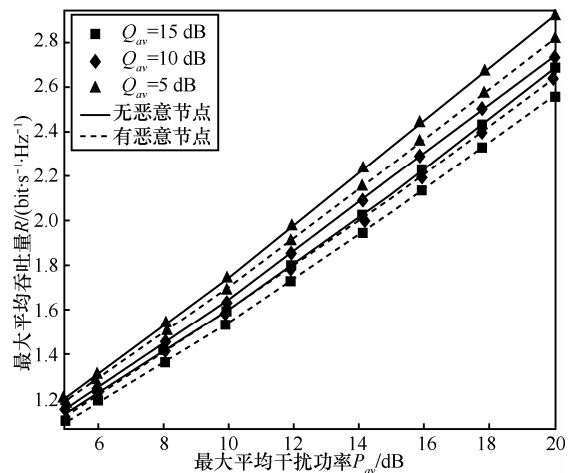


图 7 在 3 种不同的最大平均干扰功率限制下，带有恶意节点的次级网络和不带恶意节点的次级网络的最大平均吞吐量随最大平均发射功率的变化关系

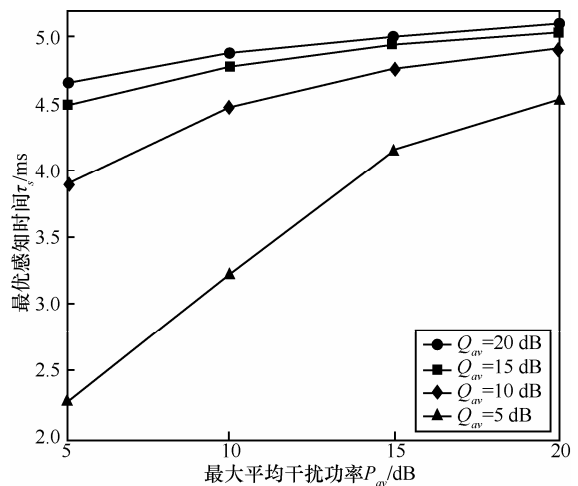


图 8 在带有恶意节点的次级网络的 4 个不同的最大平均干扰功率限制下，最优感知时间随最大平均发射功率的变化

如图 8 所示，在 4 种不同的最大平均干扰功率限制下，最优感知时间随最大平均发射功率的变化。从图中可以看出，4 种情况下最优感知时间都是随平均发射功率 P_{av} 增加而增加的，只是当平均干

扰功率 Q_{av} 较低时, 最优的感知时间的增长是比较缓慢的。但当平均干扰功率较大时, 最优感知时间是随最大平均干扰功率增大而快速增大的。而且当平均发射功率 P_{av} 一定时, 最优感知时间与平均干扰功率 Q_{av} 之间是成单调递减的关系。从图中可以看出, 当平均干扰功率取值越小, 平均发射功率均取值越大时, 次级网络可以在较短的时间里使吞吐量达到最大, 即此时频谱利用效率最高。

5 结束语

本文以更为实际的频谱感知环境为背景, 提出了一种基于合作感知的频谱共享的网络模型, 采用合作感知的方法有效地解决了阴影效应、信道衰减等客观因素对频谱感知造成的影响, 并有效地防御了恶意节点的故意攻击, 保证了整个网络的频谱感知性能。之后基于感知结果和频谱共享策略得到了以最大化网络的平均吞吐量为目标函数的一个优化问题, 对网络中节点的感知时间和信号发射功率进行最优控制使吞吐量达到最大, 充分有效地利用了紧缺的频谱资源。本文关于恶意节点没有提出专门的检测方法进行排除, 而是采用合作感知的方法进行有效的防御, 但此时恶意节点发起的攻击还是对频谱感知造成了一定的影响。所以为了更加准确地进行频谱感知, 后期将以此作为出发点把安全问题考虑全面, 并就如何检测并删除恶意节点进行进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] III J M. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2000.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [4] MUSAVIAN L, AISSA S. Ergodic and outage capacities of spectrum-sharing systems in fading channels[A]. Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'07[C]. 2007. 3327-3331.
- [5] SONG M, XIN C, ZHAO Y, *et al.* Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(1): 23-29.
- [6] KANG X, LIANG Y C, GARG H K, *et al.* Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4649-4654.
- [7] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C Y, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [8] PEH E C Y, LIANG Y C, GUAN Y L, *et al.* Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: a sensing-throughput tradeoff view[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294-5299.
- [9] YU H, TANG W, LI S. Optimization of cooperative spectrum sensing with sensing user selection in cognitive radio networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 2011(1): 1-8.
- [10] TEHRANI M N, UYSAL M. Sensing-throughput tradeoff in cooperative spectrum sensing[A]. Globecom Workshops[C]. 2012. 174-179.
- [11] PEH E C Y, LIANG Y C, GUAN Y L, *et al.* Power control in cognitive radios under cooperative and non-cooperative spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 4238-4248.
- [12] KANG X, LIANG Y C, NALLANATHAN A. Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks under transmit and interference power constraints[A]. Communications, ICC'08, IEEE International Conference[C]. 2008. 3568-3572.
- [13] STOTAS S, NALLANATHAN A. Optimal sensing time and power allocation in multiband cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(1): 226-235.
- [14] WANG W, LI H, SUN Y, *et al.* Securing collaborative spectrum sensing against untrustworthy secondary users in cognitive radio networks[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010: 4
- [15] KANG X, LIANG Y C, NALLANATHAN A, *et al.* Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: ergodic capacity and outage capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 940-950.
- [16] ZHANG L, LIANG Y C, XIN Y. Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 38-51.
- [17] ZHANG R. Optimal power control over fading cognitive radio channel by exploiting primary user CSI[A]. Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008[C]. 2008. 1-5.
- [18] BEN-TAL A, NEMIROVSKIĬ A S. Lectures on Modern Convex Optimization: Analysis, Algorithms, and Engineering Applications[M]. Siam, 2001.

作者简介:



齐小刚 (1973-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为网络算法分析与设计、复杂系统建模与优化。

郑圣瑜 (1990-), 男, 江西鹰潭人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络的频谱感知技术。

刘立芳[通信作者] (1972-), 女, 甘肃兰州人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为算法理论及应用、网络安全与性能优化、网络信息系统。E-mail: lliu@xidian.edu.cn。

王慧芳 (1989-), 女, 山西吕梁人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线传感网络的抗毁性。