



基于多主用户活跃性的多功率认知接入策略

李晓宇, 杨守义, 赵晓娟, 张瑞哲
(郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对大多数认知无线电场景中存在多个主用户, 且具有较强活跃性的问题, 提出了一种基于授权用户活跃性的多主用户多状态认知接入机制以及对应的多功率接入策略。该方法能够使认知用户选择最优的授权信道接入, 并采用合适的功率进行传输, 实现了认知系统吞吐量的最大化。数值仿真结果表明, 该接入机制能够使认知用户充分利用多主用户信息和资源。与传统的功率接入方式相比, 既能减小对主用户的干扰, 又能提升认知系统的容量。

关键词: 认知无线电; 多主用户; 主用户活跃性; 多功率分配

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017281

Multi-power cognitive access strategy based on multiple primary user traffic

LI Xiaoyu, YANG Shouyi, ZHAO Xiaojuan, ZHANG Ruizhe
College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In most of the cognitive radio (CR) network scenarios, there are multiple primary users (PU) with intense traffic. A novel multi-PU multi-state CR access mechanism and the corresponding multi-power access strategy based on the primary user traffic were proposed to address this problem. The method enabled the secondary user (SU) to access the optimal channel and adopt an appropriate power to transmit data, which could maximize the throughput of the CR system. Numerical simulation results show that the proposed method can enable the SU to take advantage of the information and resource of the multi-PU. The method not only minimizes the interference to the primary user, but also improves the achievable throughput of the CR system.

Key words: cognitive radio, multiple primary users, primary user traffic, multi-power allocation

1 引言

近年来, 随着无线通信业务的迅速发展, 需要越来越多的频谱资源, 这使得原本有限的频谱

资源变得更加稀缺。认知无线电技术是解决这一问题的关键方法^[1]。非授权用户(认知用户, SU)可以感知授权用户(主用户, PU)未使用的频谱(信道), 并动态地接入这些可用的频谱, 对于解

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1604159); 国家重点研发计划政府间专项项目 (No.2016YFE0118400)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U1604159), Special Project for Inter-Government Collaboration of State Key Research and Development Program (No.2016YFE0118400)

决频谱资源缺乏问题具有潜在的优势^[2]。现阶段认知用户接入授权频带的方式主要有机会频谱接入、频谱共享接入和基于感知的频谱共享接入3种^[3]。其中,第3种接入方式是机会频谱接入和频谱共享接入之间的混合方法。

目前,针对认知无线电环境下的优化问题已有了不少的研究成果。参考文献[3]分析了伺机接入模型和基于感知的频谱共享模型下认知网络的性能比较。参考文献[4]研究的是伺机接入机制下认知网络的功率分配模型,认知网络只有感知授权用户空闲时才进行数据传输。参考文献[5]研究的是基于感知的频谱共享的机制下认知网络的功率分配模型,认知用户感知到信道空闲时,以大功率进行数据传输,信道忙碌时,以小功率进行数据传输。参考文献[6]研究了基于非完美感知的频谱机会接入和频谱共享接入下的资源分配模型。参考文献[7]研究了主用户活跃性对认知网络感知性能的影响。参考文献[8,9]分析了授权用户的随机到达或离开对认知系统性能的影响。参考文献[10]研究了TV频段多载波系统频谱共享接入下的多主用户资源分配模型。以上研究的认知接入场景主要集中于单主用户的情况。然而,大多数认知无线网络场景中,如蜂窝端到端(device-to-device, D2D)混合网络中,主用户(蜂窝用户)是多个的,且具有较强的活跃性,因此认知用户(D2D用户)要有相适应的认知接入策略。现有文献对认知网络中存在多个授权信道,并且占用每个授权信道的主用户具有较强活跃性的情形的研究成果还不是很多。因此如何充分利用多个授权频带的信息和资源、如何在认知无线电非完美感知下设计合适的认知接入方式以及如何处理主用户活跃性问题,以提高频谱利用率和系统性能,仍是迫切需要进一步研究的问题。

为此,本文在对主用户活跃性分析的基础上,提出了一种多主用户多状态认知接入机制以及对

应的多功率接入策略。这种认知接入机制能够使认知用户选择最优的授权信道进行传输,并且采用对应的三功率接入策略,既能够减小对主用户的干扰又能使认知系统的容量最大化。仿真结果表明,授权频带增多时,认知系统可达到的吞吐量明显提高。并且与传统的功率接入方式对比发现,本文采用的三功率接入策略既能够减小对授权用户的干扰又能够提高系统的性能。同时仿真也分析了主用户活跃性、主用户接收端信噪比等对认知网络性能的影响。

2 系统模型

本文采用的认知系统模型包含两类用户:一类是授权用户,能够随时接入授权信道;另一类是认知用户,根据授权用户的状态,在不对主用户产生严重干扰的前提下,分配合适的功率进行数据传输。系统模型如图1所示,包含 N 个主用户发射端PU-TX、接收端PU-RX以及一个认知用户发射端SU-TX和接收端SU-RX。这里假设每个授权信道只存在一个授权用户。图1中 g_{ps} 、 g_{sp} 和 g_{ss} 分别代表PU-TX到SU-RX、SU-TX到PU-RX和SU-TX到SU-RX之间的信道功率增益。这里假设信道为平稳快衰落信道,且认知用户受到的噪声干扰为独立同分布的复高斯白随机噪声,均值为0、方差为 N_0 。

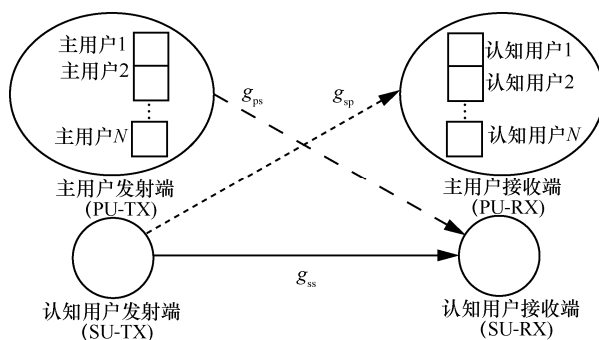


图1 多主用户认知系统模型

本文采用的感知模型为传统的帧结构模型^[11-13],帧长为 T 。如图2所示,帧结构分为两部分:感知



阶段 τ 和数据传输阶段 $T-\tau$ 。认知用户利用每帧的感知阶段检测主用户的状态, 然后根据检测结果动态地接入授权频带^[14]。

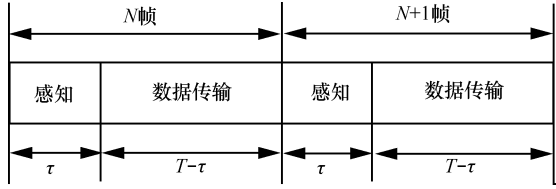


图2 传统帧结构

考虑到主用户的活跃性, 假设主用户保持忙碌和空闲状态的持续时间分别服从参数为 λ 和 μ 的指数分布^[8]。故主用户的忙碌和空闲概率分别为 $p_b = \lambda/(\lambda + \mu)$, $p_e = 1 - p_b$ 。那么该信道从 T_s 时刻前的 $\theta \in \{0, 1\}$ 转移成为 $\varphi \in \{0, 1\}$ 的状态转移矩阵如下:

$$P_{\theta, \varphi}(T_s) = \begin{bmatrix} p_{00}(T_s) & p_{01}(T_s) \\ p_{10}(T_s) & p_{11}(T_s) \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda + \mu} \begin{bmatrix} \lambda + \mu e^{-(\lambda + \mu)T_s} & \mu - \mu e^{-(\lambda + \mu)T_s} \\ \lambda - \lambda e^{-(\lambda + \mu)T_s} & \mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)T_s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, T_s 表示采样间隔, “0” 表示主用户未占用授权信道, “1” 表示主用户占用授权信道。

为便于研究, 假设 N 个授权用户的特征全部相同, 彼此之间相互独立。并且假定在一个认知帧内主用户最多发生一次状态改变^[8]。基于上述假设, 认知网络对 N 个授权频带的检测结果都可以表示为:

$$Y = \begin{cases} \sum_{i=1}^d (S_i + n_i)^2 + \sum_{i=d+1}^I n_i^2, & H_{10} \\ \sum_{i=1}^I n_i^2, & H_{00} \\ \sum_{i=1}^I (S_i + n_i)^2, & H_{11} \\ \sum_{i=1}^a n_i^2 + \sum_{i=a+1}^I (S_i + n_i)^2, & H_{01} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $I = \tau f_s$ 表示感知阶段内总的采样次数, f_s 为样本采样频率, S_i 表示主用户发射端样本信号, n_i 表示采样过程中的加性高斯白噪声, Y 表

示能量检测的结果。 H_{10} 状态表示在感知阶段, 授权用户在前 d 个采样时刻占用信道, 之后离开; H_{00} 状态和 H_{11} 状态分别表示在感知阶段, 授权信道始终保持空闲或忙碌状态; H_{01} 状态表示在感知阶段, 授权用户在前 a 个采样时刻不占用信道, 之后到来。如果 $d = 0$, $H_{10} = H_{00}$; 如果 $a = 0$, $H_{01} = H_{11}$ 。

4 种情况下的条件虚警概率或条件检测概率可以通过式 (2) 得出^[8]。 H_{10} 状态和 H_{00} 状态的条件虚警概率可表示为:

$$P_{faH_{10}}(\eta, I, d) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta - I - d\gamma_p}{2\sqrt{2}\sqrt{\frac{I}{2} + d\gamma_p}} \right) \quad (3)$$

$$P_{faH_{00}}(\eta, I) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta - I}{2\sqrt{I}} \right) \quad (4)$$

其中, γ_p 为认知用户接收端主用户信噪比。

由于 H_{10} 表示在感知阶段的 d 采样时刻信道状态发生改变, 因此条件虚警概率与 d 相关。 H_{11} 状态和 H_{01} 状态的条件检测概率分别为:

$$P_{deH_{1,1}}(\eta, I) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta - I - I\gamma_p}{2\sqrt{I + 2I\gamma_p}} \right) \quad (5)$$

$$P_{deH_{0,1}}(\eta, I, a) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta - I - (I - a)\gamma_p}{2\sqrt{I + 2(I - a)\gamma_p}} \right) \quad (6)$$

其中, 由于 H_{01} 表示在感知阶段的 a 采样时刻信道状态发生改变, 因此条件检测概率与 a 相关。

4 种情况发生的概率可以通过式 (1) 求出, 分别为:

$$\begin{cases} P_{H_{10}}(T_s) = \sum_{d=1}^I (p_b p_{11}^d(T_s) p_{10}(T_s) p_{00}^{J-d-1}(T_s)) \\ P_{H_{00}}(T_s) = p_e p_{00}^J(T_s) + \sum_{a=I+1}^{J-1} (p_e p_{00}^a(T_s) p_{01}(T_s) p_{11}^{J-a-1}(T_s)) \\ P_{H_{11}}(T_s) = p_b p_{11}^J(T_s) + \sum_{d=I+1}^{J-1} (p_b p_{11}^d(T_s) p_{10}(T_s) p_{00}^{J-d-1}(T_s)) \\ P_{H_{01}}(T_s) = \sum_{a=1}^I (p_e p_{00}^a(T_s) p_{01}(T_s) p_{11}^{J-a-1}(T_s)) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $J = Tf_s$ 表示在一帧时间内总的采样次数。

因此, 无条件虚警概率和无条件检测概率可以通过对条件虚警概率和条件检测概率取求均值分别得出:

$$\overline{P_{faN}}(\eta, I) = \frac{P_{H_{00}}(T_s)P_{faH_{00}}(\eta, I)}{P_{H_{10}}(T_s) + P_{H_{00}}(T_s)} + \sum_{d=1}^I \left(\frac{(p_b p_{11}^d(T_s) p_{10}(T_s) p_{00}^{J-d-1}(T_s)) P_{faH_{10}}(\eta, I, d)}{P_{H_{10}}(T_s) + P_{H_{00}}(T_s)} \right) \quad (8)$$

$$\overline{P_{deN}}(\eta, I) = \frac{P_{H_{11}}(T_s)P_{deH_{11}}(\eta, I)}{P_{H_{01}}(T_s) + P_{H_{11}}(T_s)} + \sum_{a=1}^I \left(\frac{(p_e p_{00}^a(T_s) p_{01}(T_s) p_{11}^{J-a-1}(T_s)) P_{deH_{01}}(\eta, I, a)}{P_{H_{01}}(T_s) + P_{H_{11}}(T_s)} \right) \quad (9)$$

3 多主用户多功率接入策略

认知用户在对授权用户的感知阶段结束之后, 动态地接入授权频带传输数据。目前传统的功率接入模型(机会接入模型和二功率接入模型)^[5,8], 即当检测出主用户处于 H_{10} 或 H_{00} 状态时, 认知用户以大功率 P_H 进行传输; 当检测出主用户处于 H_{11} 或 H_{01} 状态时, 认知用户不接入授权频带或者以小功率 P_L 传输数据。然而由于一个认知帧内主用户的状态随时可能改变, 若采用传统的功率接入方式, 可能会在主用户状态发生改变时对主用户产生严重干扰或者使得认知用户不能充分利用授权频带。

为此, 本文采用一种三功率接入模型, 其对应的认知功率接入策略为:

$$P = \begin{cases} P_H, & H_{10} \\ P_M, & H_{00} \\ P_M, & H_{11} \\ P_L, & H_{01} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_H \geq P_M \geq P_L$, 为 3 种不同的接入功率。

当认知网络中授权用户多于 1 个时, 情况就变得比较复杂。认知网络中存在多个授权频带,

并且每个授权频带所处的状态都不确定时, 认知用户如何选择最优的授权频带接入, 并且如何计算该接入方式下认知系统的吞吐量, 是一个难题。为解决这一问题, 提出了一种基于授权用户活跃性的多主用户多状态认知接入机制。

认知用户在每帧的频谱感知阶段感知 N 个授权用户的状态, 每个授权用户所处的状态都是 H_{10} 、 H_{00} 、 H_{11} 、 H_{01} 中的一种。根据上述功率分配策略, 为了使认知系统吞吐量最大化, 这里假设 4 种状态接入的优先级顺序为: $H_{10} > H_{00} > H_{11} > H_{01}$ 。基于上述假设, 所提出的接入机制表述如下。

步骤 1 认知网络对 N 个主用户的状态进行频谱感知, 检测出每个主用户所处的状态。

步骤 2 判断 N 个主用户中是否存在处于 H_{10} 状态的情况, 如果存在, 则认知用户随机接入一个处于 H_{10} 状态的授权频带, 以大功率 P_H 完成数据传输; 如果不存在, 进行步骤 3。

步骤 3 判断 N 个主用户中是否存在处于 H_{00} 状态的情况, 若存在, 则认知用户随机接入一个处于 H_{00} 状态的授权频带, 以中等功率 P_M 完成数据传输; 如果不存在, 进行步骤 4。

步骤 4 判断 N 个主用户中是否存在处于 H_{11} 状态的情况, 若存在, 则认知用户随机接入一个处于 H_{11} 状态的授权频带, 以中等功率 P_M 完成数据传输; 如果不存在, 进行步骤 5。

步骤 5 此时 N 个主用户全部处于 H_{01} 状态, 认知用户随机接入一个处于 H_{01} 状态的授权频带, 以小功率 P_L 完成数据传输。

考虑到实际情况中的频谱感知为非完美感知, 因此, 检测出每个授权用户处于 H_{10} 、 H_{00} 、 H_{11} 、 H_{01} 状态的概率分别为:

$$p_{H_{10}} = P_{H_{10}}(T_s) (1 - \overline{P_{faN}}(\eta, I)) \quad (11)$$

$$p_{H_{00}} = P_{H_{00}}(T_s) (1 - \overline{P_{faN}}(\eta, I)) + P_{H_{11}}(T_s) (1 - \overline{P_{deN}}(\eta, I)) + P_{H_{01}}(T_s) (1 - \overline{P_{deN}}(\eta, I)) \quad (12)$$



$$p_{H_{11}} = P_{H_{11}}(T_s) \overline{P_{deN}}(\eta, I) + P_{H_{00}}(T_s) \overline{P_{faN}}(\eta, I) + P_{H_{10}}(T_s) \overline{P_{faN}}(\eta, I) \quad (13)$$

$$p_{H_{01}} = P_{H_{01}}(T_s) \overline{P_{deN}}(\eta, I) \quad (14)$$

根据上述提出的多主用户多功率接入策略, 经推导可以得出, 当认知网络存在 N 个主用户时, 认知用户接入处于 H_{10} 、 H_{00} 、 H_{11} 、 H_{01} 状态的授权频带的概率分别为:

$$P_{H_{10}, N} = 1 - (1 - p_{H_{10}})^N \quad (15)$$

$$P_{H_{00}, N} = (1 - p_{H_{10}})^N - (1 - p_{H_{10}} - p_{H_{00}})^N \quad (16)$$

$$P_{H_{11}, N} = (1 - p_{H_{10}} - p_{H_{00}})^N - p_{H_{01}}^N \quad (17)$$

$$P_{H_{01}, N} = p_{H_{01}}^N \quad (18)$$

认知用户接入处于 H_{10} 状态的授权频带时可得到的信道容量为:

$$K_{H_{10}} = \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ss} P_H}{N_0} \right) \quad (19)$$

认知用户接入处于 H_{00} 状态的授权频带时可得到的信道容量可以表示为:

$$K_{H_{00}} = \frac{1}{A} \cdot \left((1 - \overline{P_{faN}}(\eta, I)) (P(H_{00}, J) K_{H_{00}}(J) + P(H_{00}, a) K_{H_{00}}(a)) + (1 - \overline{P_{deN}}(\eta, I)) (P(H_{11}, J) + P_{H_{01}}(T_s)) K_{H_{11}}(J) + P(H_{11}, d) K_{H_{11}}(d)) \right) \quad (20)$$

其中:

$$A = (1 - \overline{P_{faN}}(\eta, I)) P_{H_{00}}(T_s) + (1 - \overline{P_{deN}}(\eta, I)) (P_{H_{11}}(T_s) + P_{H_{01}}(T_s)) \quad (21)$$

$$P(H_{00}, J) = p_e p_{00}^J(T_s) \quad (22)$$

$$P(H_{00}, a) = \sum_{a=I+1}^{J-1} (p_e p_{00}^a(T_s) p_{01}(T_s) p_{11}^{J-a-1}(T_s)) \quad (23)$$

$$P(H_{11}, J) = p_b p_{11}^J(T_s) \quad (24)$$

$$P(H_{11}, d) = \sum_{d=I+1}^{J-1} (p_b p_{11}^d(T_s) p_{10}(T_s) p_{00}^{J-d-1}(T_s)) \quad (25)$$

$$K_{H_{00}}(a) = \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ss} P_M}{N_0 + \frac{J-a}{J-I} g_{ps} P_u} \right), I+1 \leq a \leq J \quad (26)$$

这里, P_u 表示主用户发射端传输功率。 $I+1 \leq a \leq J$ 表示主用户在数据传输阶段可能随时到达。 $a=J$ 表示在数据传输阶段主用户始终保持空闲状态。

$$K_{H_{11}}(d) = \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ss} P_M}{N_0 + \frac{d-J}{J-I} g_{ps} P_u} \right), I+1 \leq d \leq J \quad (27)$$

这里, $I+1 \leq d \leq J$ 表示在数据传输阶段主用户可能随时离开。当 $d=J$ 时, 表示在数据传输阶段主用户始终占用授权频带。

认知用户接入处于 H_{11} 状态的授权频带时可得到的信道容量可以表示为:

$$K_{H_{11}} = \frac{1}{A_2} \cdot (\overline{P_{faN}}(\eta, I) (P(H_{00}, J) + P_{H_{10}}(T_s)) K_{H_{00}}(J) + P(H_{00}, a) K_{H_{00}}(a) + \overline{P_{deN}}(\eta, I) (P(H_{11}, J) K_{H_{11}}(J) + P(H_{11}, d) K_{H_{11}}(d))) \quad (28)$$

其中:

$$A_2 = \overline{P_{faN}}(\eta, I) (P_{H_{00}}(T_s) + P_{H_{10}}(T_s)) + \overline{P_{deN}}(\eta, I) P_{H_{11}}(T_s) \quad (29)$$

认知用户接入处于 H_{01} 状态的授权频带时可得到的信道容量可以表示为:

$$K_{H_{01}} = \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ss} P_L}{N_0 + g_{ps} P_u} \right) \quad (30)$$

至此, 能够得到当认知网络存在 N 个主用户时, 认知系统可得到的遍历性容量可以表示为:

$$C_N = C_{H_{10}, N} + C_{H_{00}, N} + C_{H_{11}, N} + C_{H_{01}, N} \quad (31)$$

其中:

$$C_{H_{10}, N} = \frac{T-\tau}{T} (P_{H_{10}, N} K_{H_{10}}) \quad (32)$$

$$C_{H_{00}, N} = \frac{T-\tau}{T} (P_{H_{00}, N} K_{H_{00}}) \quad (33)$$

$$C_{H_{11},N} = \frac{T-\tau}{T} (P_{H_{11},N} K_{H_{11}}) \quad (34)$$

$$C_{H_{01},N} = \frac{T-\tau}{T} (P_{H_{01},N} K_{H_{01}}) \quad (35)$$

4 仿真与分析

通过 MATLAB 仿真对所提出的多主用户多状态认知接入机制进行了分析验证。系统参数设置如下：噪声方差 $N_0 = 1$ ，帧长 $T = 100$ ms，抽样间隔 $T_s = 1$ μ s，检测概率 $P_d = 0.9$ 。考虑对主用户的最大干扰功率限制条件，即当主用户使用授权频带时，认知用户存在最大传输功率的限制，仿真中三功率接入模型中功率设定为： P_H 、 $P_M = 0.5P_H$ 、 $P_L = 0.1P_H$ 。

图 3 分析了不同授权用户数量对认知系统吞吐量的影响。其中，授权用户活跃性指数设定为 $\lambda = \mu = 5$ ， $P_H = 10$ dB。由图 3 可以发现，认知网络中可接入的授权频带 N 增多时，能够明显提高认知系统的吞吐量。这是由于当可使用的授权频带增多时，认知用户接入在数据传输阶段始终处于空闲状态的信道的概率增加，即认知用户以较大功率进行数据传输的概率增加。同时由图 3 可知，当认知用户接收端主用户信噪比 γ_p 减小时，认知系统的容量随之减小。这是因为当 γ_p 减小时，

认知用户感知的性能会降低，虚警概率变大，认知用户以较大功率传输的概率减小。另外，由于 γ_p 减小，感知性能会下降，因此最佳感知时间会相应增加。从图 3 还可以发现，当主用户数 N 增加时， γ_p 的变化对认知系统容量的影响减小，这是因为当 N 增加时，同时出现虚警的概率会减小，因此本文提出的多主用户多状态接入策略不仅可以使认知用户选择最优的授权信道接入，提高认知系统吞吐量，还可以减小 γ_p 变化对认知系统的影响。

图 4 比较了两种功率接入策略（三功率和二功率接入策略）的认知系统性能。横坐标表示在对主用户的最大干扰限制条件下，允许认知用户传输的最大功率。二功率接入方式设定为 $P_0 = 0.5P_H$ ， $P_1 = 0.1P_H$ 。 $\lambda = \mu = 5$ ， $\gamma_p = -5$ dB。当最大干扰功率限制变大时，允许认知用户进行数据传输的功率会随之增加。由图 4 可以看出，当干扰限制变宽松时，两种功率接入策略下认知系统可得到的吞吐量都会增加。对比两种功率接入策略可以发现，当干扰限制比较严格时，即允许认知用户传输的功率较小时，两种功率接入策略下可获得的系统容量相差不大。随着最大干扰功率限制变宽松，三功率接入策略要优于二功率接入策略，并且干扰限制越宽松，越能体现出本文采用三功率接入策略的优势。

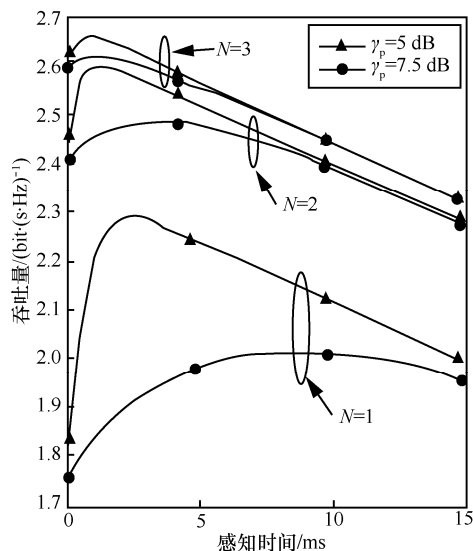


图 3 认知系统吞吐量随感知时间变化

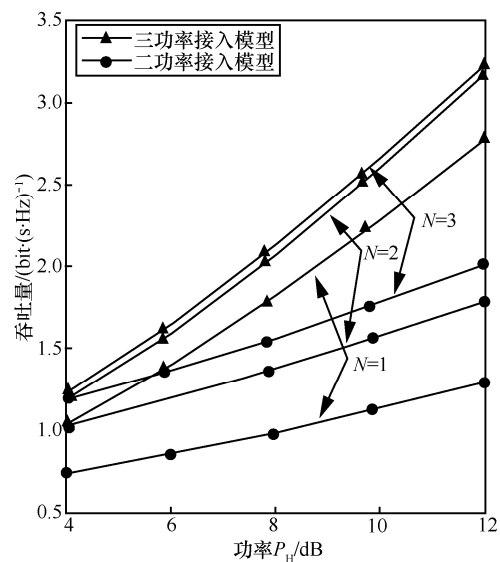


图 4 最大传输功率对认知系统吞吐量的影响



图 5 给出了主用户活跃性指数不同时认知系统可达到的最大吞吐量。这里参数设定为: $P_H = 5$ dB, $\gamma_p = -5$ dB。仿真对比了 $\lambda = \mu = 5, 10$ 和 15 的情况。 λ 和 μ 的值越大, 表示主用户越活跃。由图 5 可知, 授权用户越活跃, 认知网络可得到的系统容量越低。还可以看出主用户的活跃性基本不对认知系统的最佳感知时间产生影响。

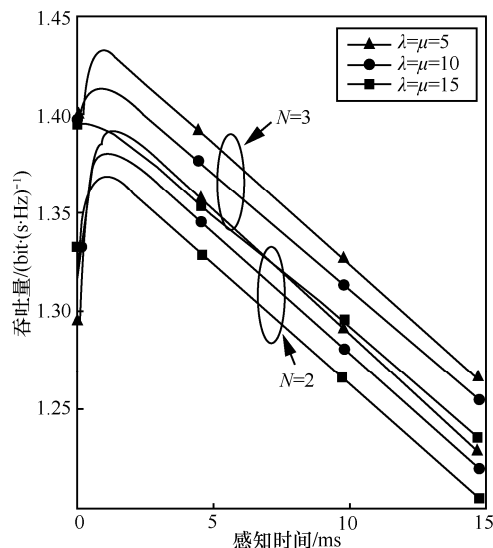


图 5 授权用户活跃性对认知系统吞吐量的影响

5 结束语

本文提出了一种基于授权用户活跃性的多主用户多功率认知接入策略。并且理论推导了该方式下的系统容量数学表达式。仿真结果表明, 该接入策略能够充分利用多主用户信息和资源, 提高了频谱资源利用率和系统性能。下一步工作将研究认知无线电场中同时存在多个主用户和多个认知用户的情况。

参考文献:

- [1] LIANG J C, CHEN J C. Resource allocation in cognitive radio relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(3): 476-488.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] 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.
- [4] HOANG A T, LIANG Y C, ZENG Y. Distributed opportunistic spectrum access with imperfect spectrum sensing[C]//2010 IEEE International Conference on Communication Systems, Nov 17-19, 2010, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 2010: 87-91.
- [5] WU X, XU J L, CHEN M, et al. Optimal energy-efficient sensing and power allocation in cognitive radio networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(3): 1-7.
- [6] 梁爽, 杨守义, 郝万明. 基于认知无线电的双向中继网络的资源分配[J]. 电信科学, 2015, 31(3): 81-89.
LIANG S, YANG S Y, HAO W M. Resource allocation for two-way relay network based on cognitive radio[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(3): 81-89.
- [7] ZHAO B, CHEN Y F, HE C. Performance analysis of spectrum sensing with multiple primary users[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(2): 914-918.
- [8] TANG L, CHEN Y F, HINES E L, et al. Effect of primary user traffic on sensing-throughput tradeoff for cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1063-1068.
- [9] PRADHAN H, KALAMKAR S S, BANERJEE A. Sensing-throughput trade off in cognitive radio with random arrivals and departures of multiple primary users[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(3): 415-418.
- [10] 李鑫滨, 石爱武, 宋兴芳. Underlay 模式下认知无线电 OFDM 系统多用户资源分配[J]. 电信科学, 2013, 29(4): 83-88.
LI X B, SHI A W, SONG X F. Multi-users resource allocation problem in ofdm systems under the underlay spectrum sharing mode for cognitive radio[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(4): 83-88.
- [11] HOSEINI P P, BEAULIEU N C. An optimal algorithm for wideband spectrum sensing in cognitive radio systems[C]//2010 IEEE International Conference on Communications, May 23-27, 2010, Cape Town, South Africa. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [12] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E C, et al. Sensing-throughput trade off for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 4(4): 1326-1337.
- [13] PEH E C, 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.
- [14] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Survey & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.

[作者简介]



李晓宇（1994-），男，郑州大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为认知无线电、宽带无线通信。



赵晓娟（1990-），女，郑州大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为认知无线电、非正交多址。



杨守义（1965-），男，博士，郑州大学信息工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信系统、认知无线电、通信信号处理。



张瑞哲（1990-），男，郑州大学信息工程学院博士生，主要研究方向为认知无线电、无线通信系统。