

基于频谱聚合技术的多用户短波机会频谱接入

徐承龙¹ 程云鹏¹ 董文斌² 孙浩³

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 南京, 210007; 2. 中国人民解放军 63810 部队, 文昌, 571300; 3. 中国人民解放军 77226 部队, 昆明, 650000)

摘要: 研究了分布式短波机会频谱接入系统中的信道探测问题。由于频谱资源的稀缺性, 将认知无线电技术应用到短波通信得到了广泛关注。多个次级用户按序感知授权信道, 根据感知结果决策出授权信道是否可用, 利用频谱聚合技术实现数据传输。然而频谱聚合的能力受到无线通信设备的约束。本文提出一种在硬件受限条件下, 考虑次级用户间相互影响的动态的停止方法。在该方法中, 信道空闲概率能够随着信道探测过程而改变, 并且次级用户能够定期地释放先前时隙感知的信道。仿真结果表明, 所提的动态停止方法能够有效提高短波通信系统的网络性能。

关键词: 短波通信系统; 机会频谱接入; 最优停止原理; 频谱聚合; 多用户

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Multi-User HF Opportunistic Spectrum Access Based on Spectrum Aggregation

Xu Chenglong¹, Cheng Yunpeng¹, Dong Wenbin², Sun Hao³

(1. College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China; 2. Unit 63810, PLA, Wenchang, 571300, China; 3. Unit 77226, PLA, Kunming, 650000, China)

Abstract: The channel exploration problem is analyzed for the distributed HF opportunistic spectrum access (OSA) system. Due to the scarcity of the spectrum resources, applying the cognitive radio technology to the HF communication system has called extensive attentions. Multiple secondary users (SUs) sequentially sense multiple licensed channels. Then the system decides whether the channels can be used based on the sensing results. Thus, the data can be transmitted utilizing available spectrum bands by using spectrum aggregation technology. However, the ability of spectrum aggregation is constrained by hardware limitations. Therefore, a dynamic stopping approach is proposed considering the interaction among the SUs under the constraint of the hardware limitations. In the proposed stopping approach, the channel-free probability can vary with the process of channel exploration and the SUs can periodically release the previously sensed channels. Moreover, simulation results show that the throughput performance of the HF communication system can be effectively improved by the proposed dynamic stopping approach.

Key words: HF communication system; opportunistic spectrum access; optimal stopping problem; spectrum aggregation; multiple users

短波通信在无线通信领域中占据着极其重要的地位,适用于中、远距离和移动通信。与其他通信方式相比,短波通信抗毁能力和自主通信能力要强很多,因此它对军事通信有着极其重要的意义。传统的短波通信主要用于传送手键报和话音,带宽只有 3 kHz,随着短波调制解调技术的进步,利用 3 kHz 带宽可以传输数据,实现短波数据通信^[1],最高速率为 2 400 bit/s。但随着数据业务种类的拓展,短波数据通信的需求日益增强,短波通信系统对无线频谱资源的需求也相应增长,从而导致实际短波 3 kHz 带宽信道中 2 400 bit/s 通信效果难以保证,因此研究多业务条件下短波通信技术具有重要的现实意义。另一方面,很多已经分配给现有短波通信系统的频谱资源在时间和空间上都存在大量的频谱空洞,因此可以将认知无线电^[2,3]技术引入到短波通信系统中,使具有感知和接入频谱空洞的能力。然而多业务之间的相互干扰不可忽视,并且宽又可用的信道也不容易找到,这使进一步提高短波通信系统性能带来了难度,频谱聚合技术的提出为解决问题提供了新的思路。

当前,认知无线电中的机会频谱接入^[4]技术已经被引起了广泛的关注,尤其是由于能够有效地发现频谱空洞,最优停止原理作为机会频谱接入的主要决策原理之一引起了极大的关注。最优停止原理的关键在于次级用户次序地感知信道,并选择一个合适的时机接入信道。但是在多用户的情况下,两个或两个以上的次级用户同时决定接入同一个信道会导致碰撞发生,此外未被感知的信道也有可能被其他次级用户占用,这样期望吞吐量值不能准确计算,也肯定会小于单用户情况下的值。因此,如果将单用户系统中的停止方法应用于多用户的系统中,其吞吐性能必然会严重下降。此外,由于短波信道十分拥挤,业务种类的拓展和业务量的增加导致很难找到宽又可用的信道,对各类业务来说可用的频谱大多数不连续,离散的频谱资源可能不能满足各类业务对系统性能的要求。频谱聚合技术能够将多个频谱片段聚合成一个更宽的频谱,但频谱聚合的能力会受到无线通信设备的限制,导致次级用户只能利用较大范围带宽里的机会频谱中的较小部分。因此,研究基于频谱聚合技术的短波机会频谱接入十分重要且必要。尽管最优停止原理已经被广泛关注并被应用于机会频谱接入系统中,但大多数文献仅仅考虑的是单用户多信道的情形^[5-10],当然也有一些文献研究了多用户条件下的最优停止问题^[11-14]。其中文献[13]主要研究了分布式机会频谱接入系统中禁止回退型最优停止问题,提出了多用户条件下的自适应的停止算法;文献[14]研究了多用户机会频谱接入系统中认知用户感知次序的问题,提出了基于最优停止理论和强化学习的停止方法,但这些文献都没有把硬件受限下的频谱聚合技术应用于机会频谱接入系统中。

1 基础理论

1.1 最优停止原理

最优停止理论解决的是如何选择一个最佳的停止或行动时间,从而使得系统的期望收益最大,称这类问题为最优停止问题^[15]。最优停止问题在统计、经济和金融领域广泛存在。这类问题通常可以以一个贝尔曼方程描述,并通过动态规划进行求解^[16]。

一个最优停止问题的定义包含以下两个组成部分:(1)一串随机变量序列: X_1, X_2, \dots ,其联合分布满足某个已知分布;(2)一串实值收益序列: $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$ 。由此,最优停止问题可描述如下:

(1)用户序列的观测随机变量,在每一步 i ,用户可以选择停止或者继续观测;(2)如果在第 i 步停止,用户获得收益 y_i ;(3)用户需要确定一个最优的停止策略,使得期望收益最大化。

1.2 频谱聚合技术

频谱聚合^[17]技术针对下一代通信网络高的系统带宽要求与不连续的频谱分配现状之间存在的矛盾而提出,它可以将分散的信道容量难以支撑高带宽需求业务的频段聚合为完整的信道容量较大的频谱,从而支持更高的系统带宽,提高频率利用率;此外对频率相距较远的频谱段的聚合能够实现系统层面的频率选择性分集,即充分利用不同频谱的路径损耗和衰落的异质性,实现资源分配和利用的最优化。

虽然频谱聚合技术可以很好地将多个频谱聚合成一个更宽的频谱,也可以把一些不连续的频谱碎片聚合在一起,以获得更大的带宽和更高的峰值速率来满足系统对频谱资源的需求,但频谱聚合的能力会受到无线通信设备条件的限制,这将会导致次级用户只能利用较大范围带宽里的机会频谱中的较小部分。图1表示频谱聚合中3种常见的情况。假设在单位带宽上的每个空闲信道速率为 R ,如图1(a)中,次级用户在两次感知后决定停止在第2个信道上并利用空闲信道进行数据传输(1个空闲信道),那么有效速率为 $RT/(T+2t)$,若它在两次感知后继续感知下一个信道,如果如图1(b)中第3个信道空闲,那么有效速率为 $2RT/(T+3t)$,如果如图1(c)中第3个信道忙碌,那么有效速率为 $RT/(T+3t)$ 。

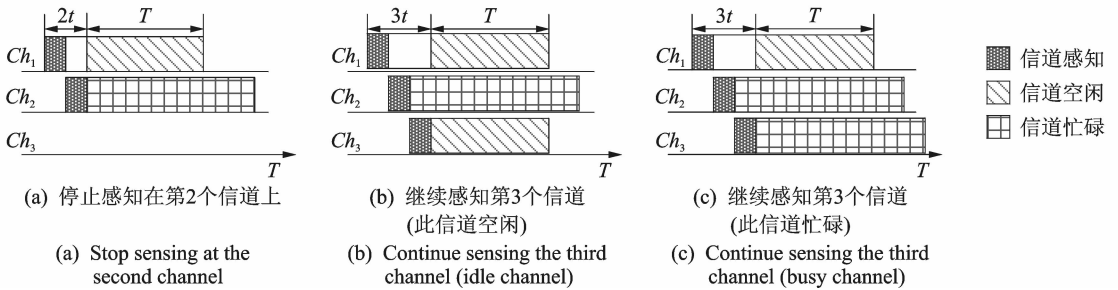


图1 频谱聚合中3种不同的感知决策

Fig. 1 Three different sensing decisions in spectrum aggregation

2 机会频谱接入系统模型

在分布式短波机会频谱接入系统中包括 M 个次级用户(短波电台)和 N 个信道,其编号分别为 $1\sim M$ 和 $1\sim N$ 。假设信道基于帧结构,并且业务开始感知时刻与帧同步。假设帧的时间长度恒定为 T ,并且在同一帧内信道质量不发生变化。信道状态根据信道是否被授权用户占用分为空闲/忙碌(1/0)两种,在每一帧内,次级用户首先要按照感知次序依次去感知信道,当发现信道空闲时,次级用户就会占用这个信道,当满足停止条件,次级用户就会停止感知进行数据传输。因为频谱聚合技术的出现使次级用户能够同时利用不相邻的信道进行数据传输,但由于硬件条件的限制,假设频谱聚合的最大宽度为 W ,即一个次级用户能够使用最多 W 个相邻信道中的空闲信道进行数据传输。 X_n 表示第 n 个感知信道的信道状态,当 $X_n=1$ 表示信道空闲; $X_n=0$ 表示信道忙碌。假设每个信道初始空闲概率都相同,为 p , t 表示次级用户感知一个信道的状态所需要的时间, C_n 表示在一个帧时间内感知 n 个信道并停止时的传输效率,则 $C_n=(T-nt)/T=1-nt/T=1-n\tau$,其中 $\tau=t/T$ 。假设每个次级用户的感知次序在每帧都随机,并且在用户与用户、帧与帧之间相互独立,也就是说,在每帧开始之前每个次级用户都需要随机产生自己的感知次序。图2为一个次级用户的信道感知过程。

3 最优停止问题

3.1 单用户在硬件受限条件下的停止问题

最优停止问题的关键在于次级用户选择一个合适的时机停止感知,使期望的吞吐量最大化。因为无穷态的最优停止问题极少出现,本文仅考虑有限态的最优停止问题,而有限态的最优停止问题能够使用向后归纳法加以解决^[13]。

在单用户系统中,若次级用户感知到最后—一个(第 N 个)信道,则必须停止,那么根据最优停止原理,可以首先推断出在第 $N-1$ 个信道上的吞吐量;若次级用户感知并停止在第 $N-1$ 个信道上,那么根据最优停止原理可以推断出在第 $N-2$ 个信道上的吞吐量;以此类推,可以推断出在第 1 个信道上的吞吐量的情况。定义系统吞吐量 $Y_N^{(N)} = y_N(x_1, x_2, \dots, x_N)$,则可以归纳出 $Y_n^{(N)} = \max(y_n(x_1, \dots, x_n), E[Y_{n+1}^{(N)}(x_1, \dots, x_n, X_{n+1}) | \{x_i\}_{i=1}^n])$,其中 $E[Y_{n+1}^{(N)}(x_1, \dots, x_n, X_{n+1}) | \{x_i\}_{i=1}^n]$ 为用户感知前 n 个信道后继续感知下一个信道时获得的期望吞吐量。因此,如果用户当前获得的吞吐量大于期望吞吐量,即 $y_n(x_1, \dots, x_n) > E[Y_{n+1}^{(N)}(x_1, \dots, x_n, X_{n+1}) | \{x_i\}_{i=1}^n]$,次级用户将停止在第 n 个信道上,这样能够最大化系统吞吐量。

b_n 表示次级用户感知第 n 个信道时可利用的信道数,它会受频谱聚合的最大宽度影响,即

$$b_n(x_1, \dots, x_n) = \sum_{k=\max(1, n-W+1)}^n x_k \quad (1)$$

因此

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = C_n R b_n(x_1, \dots, x_n) \quad (2)$$

由于向后归纳法为动态规划,其计算复杂度呈指数分布^[9],而—阶向前看与 k 阶向前看($k > 1$)的性能差异较小^[7],因此考虑—阶向前看的停止规则,其期望吞吐量

$$E[Y_{n+1}^{(n+1)} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n] = C_{n+1} R [p b_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 1) + (1-p) b_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 0)] \quad (3)$$

根据停止规则,次级用户通过比较当前吞吐量与期望吞吐量以发现一个合适的时机停止感知。但在多用户的系统中,由于次级用户间相互独立,每个用户根据自己的感知次序感知信道并可能接入信道进行数据传输,有可能不止一个次级用户同时接入同一个信道而发生碰撞,发生碰撞的用户不能有效地传输数据。由于用户认知次序随机产生,为避免碰撞,次级用户不能利用被其他用户已经占用的信道,导致有可能有些用户不能有效地接入信道进行数据传输,因此不考虑用户间相互影响的停止规则会使多用户系统性能严重下降。

3.2 多用户条件下的动态停止方法

当前分布式多用户系统的最优停止方法很难得到。如果把适合于单用户系统的停止规则用于多用户系统中,其吞吐量性能会严重下降。在分布式系统中,由于缺少公共信道,每个次级用户不知道其他用户的感知和接入情况,然而就用户间相互影响而言,被占用的信道不能被其他用户重复利用,因此考虑信道空闲概率随着信道感知过程而改变,即

$$p_n = p \cdot \left(1 - \frac{\min(n, W) - 1}{N}\right)^{M-1} \quad n \leq N \quad (4)$$

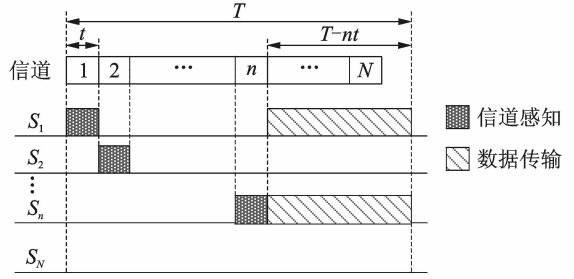


图2 单用户的信道感知过程

Fig. 2 Channel sensing procedure for a SU

在式(4)中,当 $n \leq W$ 时, p_n 逐渐递减,这是因为当被感知信道的范围不超过频谱聚合最大宽度时,信道空闲概率会随着感知信道数增多而变大;当 $n > W$ 时, p_n 将保持不变,这是由于频谱聚合宽度的限制,当次级用户感知信道时需要释放先前感知过的信道,如图 3 所示,次级用户在感知第 n 个信道的同时需要释放第 $n - W$ 个信道。此外,由于分布式系统次级用户的平等性,当一个用户感知信道时,其他用户对它的影响相同,所以信道空闲概率呈指数关系,特别地,当 $M=1$ 时, $p_n = p$,这意味着提出的方法能够适用于单用户系统中。因此,在动态的停止方法中其次级用户期望的吞吐量为

$$\begin{aligned}
 E^* [Y_{n+1}^{(n+1)} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n] &= \\
 C_{n+1} R [p_{n+1} b_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 1) + (1 - p_{n+1}) b_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 0)] &= \\
 C_{n+1} R [p_{n+1} (1 + \sum_{i=n-W+2}^n x_i) + (1 - p_{n+1}) \sum_{i=n-W+2}^n x_i] &= \\
 C_{n+1} R [p_{n+1} + \sum_{i=n-W+2}^n x_i] & \quad (5)
 \end{aligned}$$

图 4 为本文提出的动态停止方法的算法。

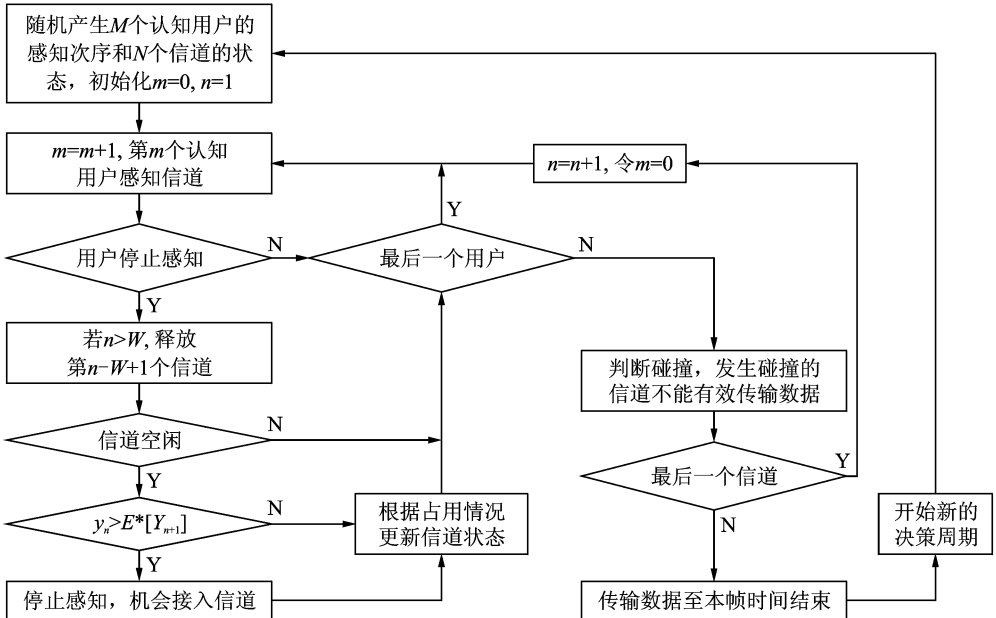


图 4 本文提出的动态停止方法的算法

Fig. 4 Algorithm of proposed dynamic stopping approach

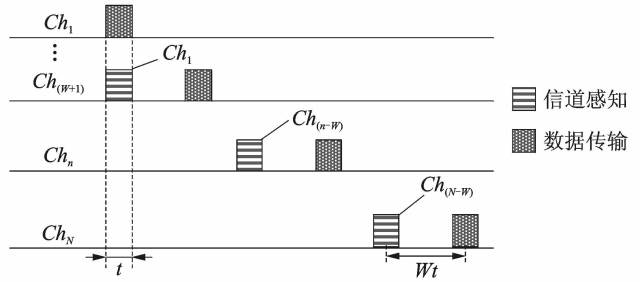


图 3 单用户感知与释放信道时刻示意图

Fig. 3 Illustration of the action point of channel sensing and releasing for a SU

4 仿真结果与分析

本文采用 Matlab 仿真结果以验证所提出的动态停止方法在分布式多用户机会频谱接入系统中的性能。参照典型的无线短波通信系统,设置仿真的基本参数:在 3 kHz 带宽上的信道速率为 2 400 bit/s,因此在单位带宽上信道速率为 $R=0.8 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。令每帧时间长度 $T=100 \text{ ms}$,用户感知一个信道的的时间 $t=5 \text{ ms}$ 。

图 5 为频谱聚合能力对系统性能的影响。由图 5 可以看出,使用本文的动态停止方法得到的系统性能要好于使用适用于单用户系统的方法^[7]。聚合能力越好,次级用户就能够同时利用越多的信道,这导致用户会开始释放信道的的时间更迟,也就意味着其他用户可能会失去更多利用空闲信道的机会。在有限的频谱资源条件下,很多用户不能有效地利用空闲频谱,所以频谱聚合的最大宽度越大不代表有越好的系统性能。

图 6 对比了在不同信道数的条件下使用两种方法所得到的系统性能。由图 6 可以看出,随着信道数的增加,使用两种方法得到的吞吐量都增大,这是因为在一定次级用户条件下,信道越多意味着每个用户能够利用更多的信道,这将导致用户间的碰撞概率降低。此外,从图 6 中还可以看出,使用本文提出的动态停止方法得到的系统性能要好于使用适用于单用户系统的方法^[7],但是当信道数 $N=9$ 时,系统性能提升大约 10%,而当 $N=3$ 时,系统性能却几乎相同,这说明本文提出的动态停止方法能够有效地应用于多用户的系统中。

从图 5,6 中可看出,信道的空闲概率越高,所获得的吞吐量越大,这是因为越高的信道空闲概率意味着有越多可用的空闲信道,这样用户有更足够的信道传输数据,因此其吞吐量性能得到改善。

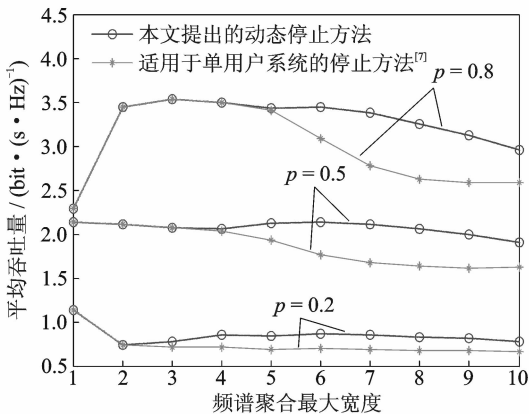


图 5 平均吞吐量与频谱聚合最大宽度的关系

Fig. 5 Average throughput versus the maximum width of spectrum aggregation ($N=10$, $M=4$)

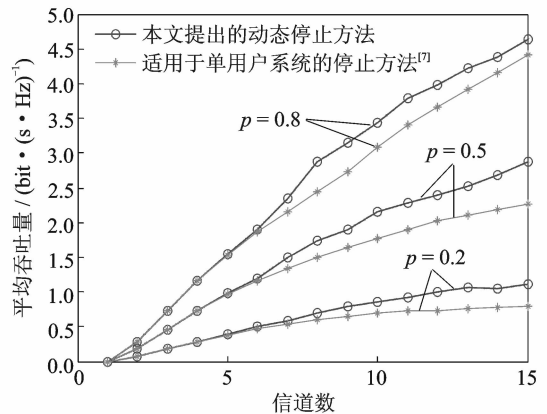


图 6 平均吞吐量与信道数的关系

Fig. 6 Average throughput versus the number of channels ($W=6$, $M=4$)

5 结束语

本文研究了分布式短波机会频谱接入系统中的最优停止问题。首先简要介绍了最优停止原理和频谱聚合技术;然后给出了分布式短波机会频谱接入系统的模型,并分析了硬件受限条件下单用户停止问题。由于单用户停止规则的局限性,其并不能适用于多用户的系统中。本文提出了一种考虑用户相互影响的动态停止方法。与适用于单用户系统的停止方法相比,本文方法能够明显提高分布式短波机会频谱接入系统的吞

吐量性能。本文最后给出了性能分析,仿真结果验证了这种动态停止方法的有效性。

参考文献:

- [1] 胡中豫. 现代短波通信[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
Hu Zhongyu. Moden shortwave communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [2] FCC. Spectrum policy task force report[R]. Washington D C, USA: FCC, 2002; 02-155.
- [3] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,2005,23(2):201-220.
- [4] Xu Y H, Anpalagan A, Shen L, et al. Decision-theoretic opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions [J]. *IEEE Communication Survey & Tutorial*,2013,15(4):1689-1713.
- [5] Sabharwal A, Khoshnevis A, Knightly E. Opportunistic spectrum usage: Bounds and a multi-band CSMA/CA protocol[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*,2007,15(3):533-545.
- [6] Kim S J, Giannakis G B. Sequential and cooperative sensing for multi-channel cognitive radios[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2010,58(8):4239-4253.
- [7] Jia Juncheng, Zhang Qian, Shen Xuemin. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,2008,26(1):106-117.
- [8] Jiang Hai, Lai Lifeng, Fan Rongfei, et al. Optimal selection of channel sensing order in cognitive radios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*,2009,8(1):297-307.
- [9] Fan Rongfei, Jiang Hai. Channel sensing-order setting in cognitive radio networks: A two-user case[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,2009,58(9):4997-5008.
- [10] Xu Yuhua, Wang Jinlong, Wu Qihui, et al. Optimal energy-efficient channel exploration for opportunistic spectrum usage [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*,2012,1(2):77-80.
- [11] Xu Yuhua, Gao Zhan, Wang Jinlong, et al. Multichannel opportunistic spectrum access in fading environment using optimal stopping rule[C]//IET International Conference on Wireles Communications and Applications. Sanya, China; IEEE,2011: 275-286.
- [12] Cheng H T, Zhuang W H. Simple channel sensing order in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,2011,29(4):676-688.
- [13] Cheng Yunpeng, Xu Chenglong, Wang Yumeng, et al. An adaptive stopping rule for distributed opportunistic spectrum access systems with multi-channel and multi-user[J]. *Frequenz*, 2014,68(3/4):183-190.
- [14] Xu Chenglong, Cheng Yunpeng, Chen Yang, et al. Multi-user opportunistic spectrum access using reinforcement learning [J]. *Advanced Materials Research*, 2014,926/927/928/929/930:2357-2361.
- [15] Ferguson T. Optimal stopping and applications[EB/OL]. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>, 2007-6-21.
- [16] Bertsekas D P. Dynamic programming and optimal control[M]. 3rd Ed. Nashna, NH: Athena Scientific,1995:283-386.
- [17] Shukla A, Willamson B, Burns J, et al. A study for the provision of aggregation of frequency to provide wider bandwidth services[R]. QINETIQ106101773, Farnborough:QinetiQ Ltd,2006:1-188.

作者简介:



徐承龙(1988-),男,硕士研究生,研究方向:认知无线电、频谱感知与聚合, E-mail:chenglong_xu@yeah.net。



程云鹏(1976-),男,博士,副教授,研究方向:通信信号处理、短波通信、频谱感知与聚合等。



董文斌(1989-),男,助理工程师,研究方向:5G通信。



孙浩(1982-),男,助理工程师,研究方向:高炮指挥、信息感知与信号处理。

