



一种认知无线电系统双门限频谱分配算法^{*}

王炯滔, 金 明, 李有明, 郑静静

(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

摘 要: 基于认知无线电系统中 Underlay 频谱共享模型, 提出了一种双门限频谱分配算法。给定两个信噪比门限, 当信噪比低于较小的门限时, 系统选择认知用户做中继协助授权用户进行数据传输, 以授权用户信道容量最大化为优化目标进行频谱分配; 当信噪比大于较大的门限时, 系统允许认知用户之间进行低功率数据传输, 以认知用户接入数量最大化为优化目标进行频谱分配; 当信噪比介于两门限之间时, 由授权用户单独进行数据传输。理论分析和仿真表明, 当授权用户信噪比低于较小门限时, 所提方法能提高授权用户的信道容量; 当授权用户信噪比大于较大门限时, 所提方法可以提高认知用户的接入数量。

关键词: 认知无线电; 双门限; 频谱分配

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.08.022

A Double-Threshold Based Spectrum Allocation Algorithm in Cognitive Radio System

Wang Jiongtao, Jin Ming, Li Youming, Zheng Jingjing

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the spectrum allocation of Underlay model in cognitive radio systems, a double-threshold based spectrum allocation algorithm was proposed. Two signal-to-noise ratio (SNR) thresholds were also given. If SNR is less than the small threshold, aiming to maximize the channel capacity of the primary users, some second users are chosen to cooperate with primary users to communicate data. If SNR is larger than the big threshold, considering to maximize the number of the second users accessing the spectrum, some second users are allowed to use the occupied spectrum with low power. If SNR is between the two thresholds, primary users occupy the spectrum alone. Simulation and numerical results illustrate the reliability of the theoretical analysis.

Key words: cognitive radio, double-threshold, spectrum allocation

1 引言

随着无线通信技术的快速发展, 无线频谱资源变得十分稀缺, 已经无法满足日益增长的无线通信技术需求^[1]。美国联邦调查委员会的一份研究报告表明, 70% 的已分配频谱没有得到充分利用^[2], 由此可见, 频谱资源利用率低是造

成频谱资源缺乏的主要原因之一。认知无线电 (cognitive radio, CR) 技术能有效提高无线电频谱的利用率, 是解决频谱资源缺乏的主要技术之一^[3]。

CR 系统中, 主要分两类用户: 授权用户, 即主要用户 (primary user, PU); 认知用户, 即次要用户 (second user, SU)。PU 是系统中的主要用户, 系统要保证 PU 能进行正

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No. 61071119), 浙江省自然科学基金资助项目 (No. Y1110657, No. Y1091155), 新一代移动互联网用户端软件科技创新团队基金资助项目 (No. 2010R50009), 宁波市自然科学基金资助项目 (No. 2011A610184)



常通信;SU 是系统中的次要用户,系统能够找出无线电环境中的频谱空洞,即不被 PU 占用的频谱,利用这些频谱空洞完成 SU 之间的数据传输,达到提高频谱利用率的目的。

CR 系统频谱共享模型主要有两类。一类是 Overlay 频谱共享模型^[4],该模型中 SU 只能使用没有被 PU 占用的频谱,SU 和 PU 不能同时使用同一频谱资源;另一类是 Underlay 频谱共享模型^[5],该模型中 PU 可与 SU 同时使用同一频谱资源,使用过程中 SU 被用作中继提高 PU 的传输性能。

在 Overlay 频谱共享模型中,主要研究的是认知用户的信道容量和接入数目。在检测出信道空闲的情况下,Wang 等分别从系统容量最大化、用户之间公平性和信道时延入手,提出了 3 种频谱分配算法^[6]。Duy T N 等在信道容量最大化和系统发射功率最小化的基础上,在 OFDMA Ad Hoc 网络中提出了 SU 子载波和功率分配联合优化算法^[7]。杜文峰等对 SU 间的干扰矩阵进行优化,提出了一种基于干扰消减的认知无线电频谱感知及资源分配算法^[8]。Chen 等提出了一种 SU 间进行协作传输的资源分配算法,并对注水算法的注水门限进行了改进,从而提高了系统的信道容量^[9]。Goldsmith 等在 SU 使用信道时,着重考虑 SU 之间的干扰情况,为 SU 设计减少干扰的数据传输规则,提出了一种图表着色模型以进行频谱分配^[10]。

在 Overlay 模型中,为了防止 SU 对 PU 的干扰,严格将这两者区分开,这种干扰出现在 PU 信号强度较弱时,会导致系统信道容量变小,通信性能下降。

在 Underlay 频谱共享模型中,主要研究在 SU 干扰环境下的认知无线电信道容量。Simeone 等人首先提出 PU 可将频谱租赁给若干个 SU,在 PU 需要协助的情况下,SU 能协助 PU 进行数据传输从而提高 PU 的传输速率^[11]。随后 Zhang 等人^[12]采用博弈论的思想建立了斯坦科伯格(Stackelberg)寡头竞争模型,即 PU 先决定它使用某频谱的时间,随后多个 SU 决定它们的出价以获取该频谱的使用时间,双方都以最大化自身效用值为最终目的。Xu 等考虑多 PU 和 SU 协作的情况,并提出了一种灵活的频谱分配方式^[13]。在参考文献[14]中,杨威等利用一种单门限的频谱分配模型,提出了集中式遗传算法和分布式遗传算法。

在 Underlay 模型中,CR 系统允许 SU 在 PU 信号强度较弱时,接入频谱协助 PU 通信,从而提高了低信噪比时 PU 的传输性能。但目前 Underlay 模型采用的均是单门限频谱分配算法,该类算法虽然能提高低信噪比时 PU 的信

道容量,但 SU 接入频谱的数量还是有限的。如果 SU 一直无法接入频谱,会出现“饿死现象”。

在 Underlay 模型基础上,本文提出了一种双门限频谱分配算法,即给定两个信噪比门限 λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$),当信噪比低于 λ_1 时,PU 选用 SU 做中继进行数据传输;当信噪比大于 λ_2 时,系统允许 SU 之间低功率传输;当信噪比介于 λ_1 和 λ_2 之间时,PU 单独进行数据传输;对于剩余的空闲频谱,由 SU 进行共享。该算法能提高低信噪比时 PU 的信道容量,在信噪比高时,能提高 SU 的接入数量。

2 系统模型

本文在如图 1 所示的 Underlay 频谱共享系统模型上进行双门限频谱资源分配。

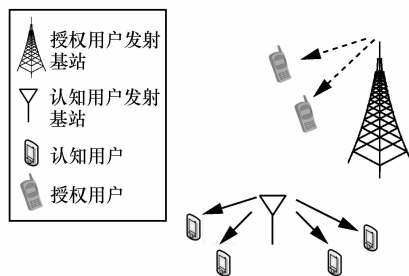


图 1 Underlay 频谱共享系统模型

假设一个 CR 网络可以划分为 K 个互不干扰的正交频段,即 K 个信道,每个信道的传输频率和覆盖范围各不相同,系统中有 M ($M \leq K$) 个 PU、 N 个 SU,定义如下矩阵。

- PU 存在矩阵。 $P=[p_i](1 \leq i \leq M)$, 即信道空闲矩阵,若 $p_i=0$,表示第 i 个 PU 不存在,若 $p_i=1$,则表示第 i 个 PU 存在。
- PU 发射功率矩阵。 $W=[w_i](1 \leq i \leq M)$, w_i 表示第 i 个 PU 在进行数据传输时的发射功率。
- SU 发射功率矩阵。 $WS=[ws_i](1 \leq i \leq N)$, ws_i 表示第 i 个 SU 在进行数据传输时的发射功率。
- PU 在各信道的信道增益矩阵。 $A=[a_{ij}](1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq K)$, a_{ij} 表示第 i 个 PU 在第 j 个信道的信道增益。
- SU 在各信道的信道增益矩阵。 $AS=[as_{ij}](1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq K)$, as_{ij} 表示第 i 个 SU 在第 j 个信道的信道增益。
- SU 之间的干扰矩阵。 $In=[in_{i,j,k}](1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K)$, $in_{i,j,k}$ 表示第 i 个 SU 和第 j 个 SU 同时占用第 k 个信道时产生的干扰。若 $in_{i,j,k}=0$,则表示

第 i 个 SU 和第 j 个 SU 同时占用第 k 个信道时不产生相互干扰,即可以同时使用目标信道;若 $in_{i,j,k}=1$,则表示第 i 个 SU 和第 j 个 SU 同时占用第 k 个信道时会产生相互干扰,即不可以同时使用目标信道。

3 双门限频谱分配算法

先将 PU 的存在概率矩阵 P 与发射功率矩阵 W 相乘得到实际各 PU 的发射功率矩阵,选出实际发射功率不为零的 PU,将这些 PU 的发射功率从小到大排列。在排列中从实际发射功率最小的 PU 开始,在各信道中选择该 PU 信道增益最大的信道。其中,假设一个 PU 只占用一个信道,一个信道可以被多个 SU 共享。下面以实际发射功率最小且不为零的 PU 为例进行频谱分配。

假设第 i 个 PU 实际发射功率最小且不为零,该 PU 选择第 j 个信道进行通信,将实际发射功率与所选的信道增益相乘,得到 PU 在接收端的接收功率。假设各信道中存在的噪声均为高斯白噪声,令 PU_i 在信道 j 中的信噪比为 λ ,给定两个信噪比门限 λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$),可将频谱分配分为以下 4 种情况。

(1) 情况 1, $\lambda < \lambda_1$, 即信噪比较低

为了提高 PU_i 在接收端的信噪比,选择一个 SU 当中继进行数据传输。因为 PU_i 已选择第 j 个信道进行通信,在此基础上选择信道 j 中增益最大的 SU 作中继,假设选择第 y 个 SU。该部分传输过程如图 2 所示。

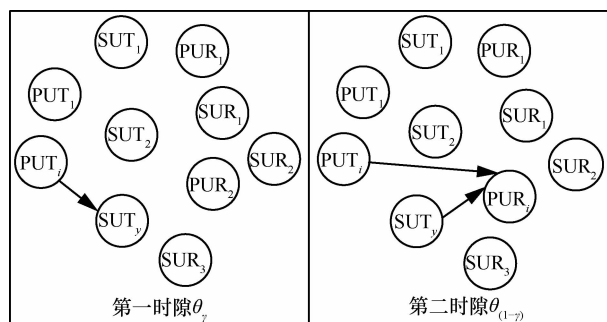


图 2 情况 1

其中, PUT_i 和 PUR_i 分别为 PU 的发射节点和接收节点, SUT_i 和 SUR_i 分别为 SU 的发射节点和接收节点, θ 为总的数据传输时间, γ 为时间划分比例系数, $0 < \gamma < 1$ 。第一个时隙 θ_γ , PU 给 SU 发射节点发送数据;第二个时隙 $\theta_{(1-\gamma)}$, PU 和 SU 同时向 PU 接收节点发送数据。

这样 PU_i 接收节点的接收信号信噪比为:

$$SNR_1 = 10 \lg \left(\frac{p_i w_i a_{ij} + w s_y a_{s_y j}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (1)$$

其中, P_{noise} 为噪声功率。没有协作情况下的接收信噪比为:

$$SNR_0 = 10 \lg \frac{p_i w_i a_{ij}}{P_{\text{noise}}} \quad (2)$$

两者比较,必有 $SNR_0 < SNR_1$ 。这种情况下,每完成一个 PU 频谱分配,更新一次信道增益矩阵 A ,即将 A 的第 j 列置零,说明第 j 个信道已经被占用。

(2) 情况 2, $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$, 即有中等的信噪比

在这种情况下, SU 不接入被 PU_i 占用的频谱,只有 PU_i 进行数据传输。该部分的传输过程如图 3 所示。

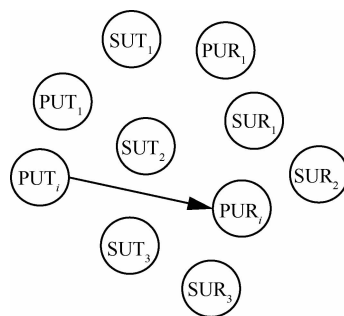


图 3 情况 2

PU_i 接收节点的接收信号信噪比为:

$$SNR_2 = 10 \lg \frac{p_i w_i a_{ij}}{P_{\text{noise}}} \quad (3)$$

这种情况下,每完成一个 PU 频谱分配,更新一次信道增益矩阵 A ,即将 A 的第 j 列置零,说明第 j 个信道已经被占用。

(3) 情况 3, $\lambda_2 < \lambda$, 即有较高的信噪比

此时选择部分 SU 在保证 PU_i 有一定传输性能的前提下接入被 PU_i 占用的频谱。这里的一定传输性能是指 PU_i 的接收端信噪比大于或等于 λ_2 。具体选择方法介绍如下。

因为 PU_i 已经选择了使自己增益最大的第 j 个信道,将 SU 的发射功率和 SU 对应于该信道的信道增益相乘,得到各 SU 在该信道中传输的实际信号功率。将所得实际信号功率从小到大排列,从最小值开始选择 SU 是否接入被占用频谱。在选择好一个 SU 后,根据 SU 的信道干扰矩阵 In 来继续选择 SU,若不与已选择的 SU 在第 j 个信道产生相互干扰,则允许接入被占用频谱,否则不允许。每选择一个 SU,重新计算一次信噪比,记为 SNR_3 。若 $\lambda_2 < SNR_3$,则继续选择 SU;若 $\lambda_2 = SNR_3$,则停止选择 SU;若 $\lambda_2 > SNR_3$,则停止选择 SU,且丢弃上一次选择的 SU。假设被允许的 SU 为



$\{SU_y, y \in Y\}$, 将被允许的 SU 信号看作干扰噪声, 重新计算 PU_i 接收端的接收信号信噪比为:

$$SNR_{S_3} = 10 \lg \frac{p_i w_i a_{ij}}{P_{\text{noise}} + \sum_y w s_y a_{sy}} \quad (4)$$

该部分的传输过程如图 4 所示。

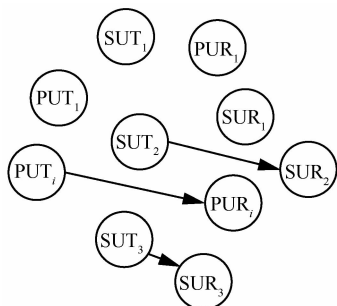


图 4 情况 3

对应参与通信的 SU 的信噪比为:

$$SNR_{S_3} = 10 \lg \frac{\sum_y w s_y a_{sy}}{P_{\text{noise}} + p_i w_i a_{ij}} \quad (5)$$

这种情况下, 每完成一个 PU 频谱分配, 更新一次信道增益矩阵 A , 即将 A 的第 j 列置零, 说明第 j 个信道已经被占用。

(4) 情况 4, 对所有的 PU 按如上过程进行频谱分配, 若 PU 分配完毕后还有频段处于空闲状态

对于剩余的空闲频谱, 目前认知用户进行频谱共享主要有两种方案: 一是以接入频谱的 SU 数量最多为优化目标进行频谱共享; 二是以系统总的信道容量最大为优化目标进行频谱共享。该部分的传输过程如图 5 所示。

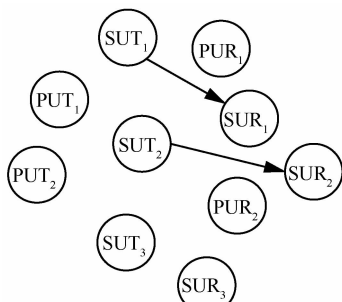


图 5 情况 4

这里采用第一种优化方案, 在进行频谱分配时找出目标频段的最大频谱共用组, 即可以同时使用目标频谱的最大 SU 组。对于第 k 个空闲信道, 根据 SU 之间的干扰矩阵 I_n , 假设可以接入的 SU 为 $\{SU_d, d \in D\}$, 即有 D 个 SU 可以互不干扰地共享频谱。则第 k 个信道 SU 的信噪

比为:

$$SNR_{S_4} = 10 \lg \frac{\sum_d w s_d a_{dk}}{P_{\text{noise}}} \quad (6)$$

这种情况下, 每完成一个频谱分配, 更新一次信道增益矩阵 AS , 即将 AS 的第 k 列置零, 说明第 k 个信道已被占用。当所有信道均被占用时, 当前时间段的频谱分配结束。

4 仿真结果与分析

当前的认知无线电频谱资源分配算法中, 主要从 PU 和 SU 的信道容量及 SU 的接入数量等方面进行优化。这部分给出 3 种情况 (即信噪比低、信噪比中等、信噪比高) 进行仿真。假设每个信道带宽 $B=1$ MHz, PU 个数为 $M=10$, SU 个数为 $N=10$, 信道个数为 $K=10$, 信噪比门限 $\lambda_1=0$ dB, $\lambda_2=10$ dB, PU 的存在矩阵为 $P=[1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, 即有 7 个 PU 处于工作状态。PU 发射功率, SU 发射功率等其他参数随机产生。

当 PU 信噪比较低 (小于 λ_1) 时, CR 系统允许 SU 接入被占用的频谱用作中继来协助 PU 进行数据传输, 得到 PU 在各信道的信道容量如图 6 所示。

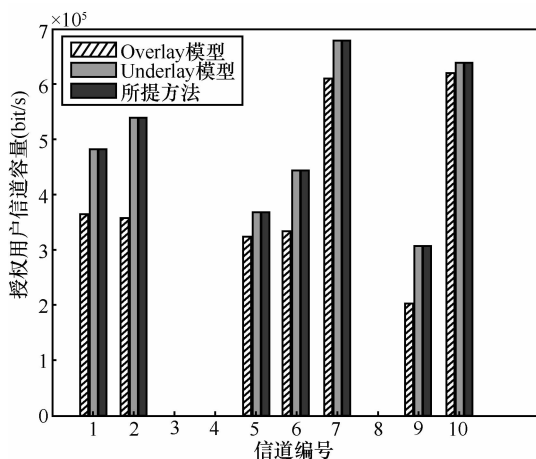


图 6 信噪比低于较小门限时授权用户的信道容量

如图 6 所示, 根据信道增益矩阵, 7 个处于工作状态的 PU 分别选择了除第 3、4 和第 8 信道之外的 7 个信道。可以看出, 信噪比较低时所提频谱资源分配算法依然保持 Underlay 模型的性能, 对于 PU 占用的各信道, 其信道容量均大于 Overlay 模型下的信道容量。

当信噪比中等 (介于 λ_1 与 λ_2 之间) 时, 频谱分配过程中先对 PU 进行分配, 再将剩余的频谱分配给 SU 进行共享, PU 和 SU 没有同时占用同一信道, 得到 PU 和 SU 的信

道容量如图7所示。

如图7所示,因为在这种情况下,PU和SU没有共用信道,它们按照各自的频谱资源分配规则进行频谱使用,所提方法与Underlay模型及Overlay模型保持了一致的资源分配性能。

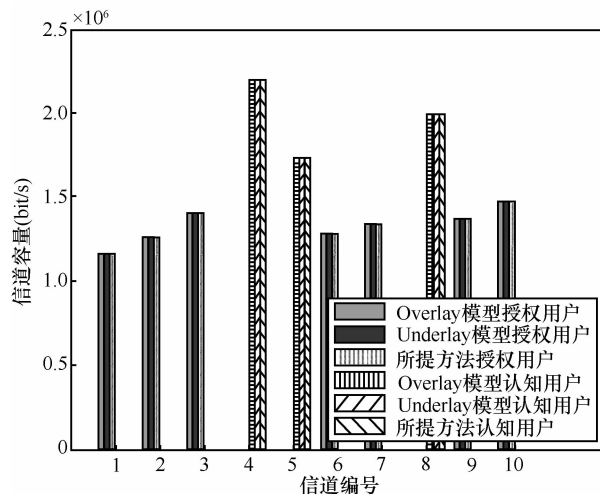


图7 信噪比介于两门限之间时的信道容量

当信噪比较高(大于 λ_2)时,CR系统允许一部分SU接入被占用的频谱,以低功率进行SU之间的数据传输。由于这里已经保证了PU有一定的信噪比,即大于或等于 λ_2 ,主要比较SU接入频谱的数量,具体如图8所示。

如图8所示,在没有被PU占用的第4、9、10信道中,SU以相同的方案进行频谱共享,所以接入频谱的用户数量是一样的。对于被PU占用的信道,Underlay模型及

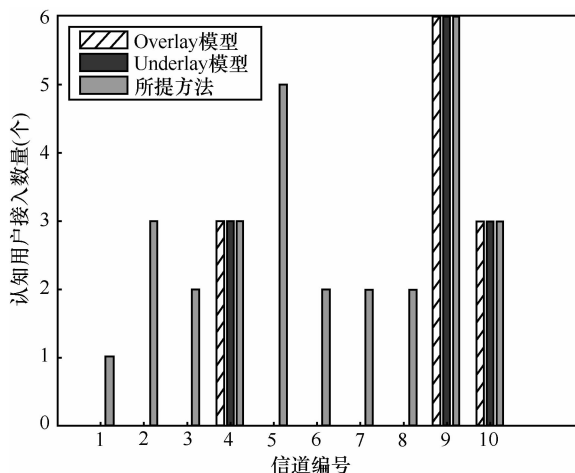


图8 信噪比大于较大门限时认知用户的接入数量

Overlay模型没有允许SU接入频谱,而所提方法能够使一定数量的SU接入。从图中可以看出,所提方法各信道总的SU接入数量比Underlay模型及Overlay模型要多,有助于缓解SU的“饿死现象”。

5 结束语

本文基于Underlay模型的单门限频谱共享方案,提出了一种双门限频谱分配算法。所提算法将PU信号的信噪比划分为低、中、高3种情况,选择符合要求的SU接入频谱。在PU信噪比较低时,所提方法可以提高授权用户的信道容量,当PU信噪比较高时,所提方法可以增加认知用户接入频谱的数量。最后的仿真结果进一步验证了理论分析的可靠性。

参考文献

- Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6 (4): 13~18
- Federal Communications Commission. Spectrum Policy Task Force Report, 2002
- Chouinard G, Lei Z D, Hu W D, *et al.* IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1):130~138
- Yadav P, Bhattacharya P P. An effective dynamic spectrum access method for use in cognitive radio. *IJCSMC*, 2013, 2(2):12~20
- Zheng H T, Peng C Y. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access. *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, China, 2005: 3132~3136
- Wang W, Liu X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks. *IEEE the 62nd Vehicular Technology Conference*, Texas, USA, 2005: 690~694
- Ngo D T, Tho L N. Distributed resource allocation for cognitive radio networks with spectrum-sharing constraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(7): 3436~3449
- 杜文峰,刘亚涛,明仲等.基于干扰消减的认知无线电频谱分配算法. *通信学报*, 2012, 33(5):106~114
- Chen C H, Wang C L, Chen C T. A resource allocation scheme for cooperative multiuser OFDM-based cognitive radio systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59 (11): 3204~3215
- Goldsmith A, Jafar S A, Maric I, *et al.* Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5):894~914

(下转第145页)

响,面对“管道化”的严峻形势和 IT、CT 不断融合的趋势,运营商通过平台化运营,构建智能管道,提升流量经营,快速响应客户需求,挖掘客户潜在价值等方面尝试业务转型。而在这个过程中,通过创造性地立足自身特点和优势,借鉴互联网企业开放、敏捷和社会化等理念,构建基于开源的云计算管理平台,实现对内部和外部 IT 资源的集约化管理,降低运营成本,提升自身运营效率和效益,可为转型之路提供全面支撑。

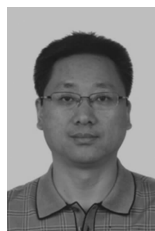
[作者简介]



杨经纬,男,中国电信集团系统集成有限责任公司云产品线经理、架构师,长期从事 IT 系统咨询、规划和设计工作,有丰富的虚拟化、云计算和数据中心网络建设实战经验。



胡林,男,高级工程师,现就职于中国电信集团系统集成有限责任公司,任软件服务部副总经理,拥有 20 多年的企业级 IT 解决方案的研究和推广经验,主要研究方向云计算、移动互联网。



李金岭,男,高级工程师,现就职于中国电信集团系统集成有限责任公司,任软件服务部总经理。主要从事无线通信、计算机通信、ICT 行业应用等领域的科研开发、工程和管理工作的。

刘志勇,男,博士,教授级高级工程师,享受国务院政府津贴,现任中国电信集团系统集成有限责任公司党组书记、总经理,对通信及信息技术、业务运营有丰富的实践和研究经验,曾在多家核心期刊发表多篇学术论文。

(收稿日期:2013-08-01)

(上接第 131 页)

- 11 Simeone O, Stanojev I, Savazzi S, *et al.* Spectrum leasing to cooperating secondary Ad Hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(1): 203~213
- 12 Zhang J, Zhang Q. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks. *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, New York, USA, 2009:23~32
- 13 Xu H, Li B C. Efficient resource allocation with flexible channel cooperation in OFDMA cognitive radio networks. *Proceeding of INFOCOM*, Toronto, Canada, 2010:561~569
- 14 杨威,班冬松,梁维发等. 认知无线电网络频谱分配与协作划分算法. *软件学报*, 2012, 23(1):122~139

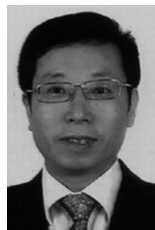
[作者简介]



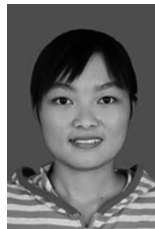
王炯滔,男,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为认知无线电中的频谱检测、资源分配等。



金明,男,宁波大学通信技术研究所以讲师,主要研究方向为认知无线电技术、智能天线技术等。



李有明,男,宁波大学通信技术研究所以教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信技术中的干扰抑制、动态资源分配、MIMO-OFDM、认知无线电等。



郑静静,女,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为智能仪器、智能无线电等。

(收稿日期:2013-05-13)