

认知 Wi-Fi 2.0 网络：未来智能无线局域网

杨春刚，徐超，盛敏，李建东，李红艳

(西安电子科技大学 信息科学研究所 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对认知 Wi-Fi 2.0 网络典型的布设场景, 总结其特有的信道捆绑等关键技术。提出双层动态频谱接入模型, 总结其多样的动态资源共享策略。面向频谱资源的高效利用和经济收益, 重点关注多种博弈模型, 刻画动态频谱接入和智能策略选择等行为。最后, 提出联合频谱的技术特性和经济收益特性的频谱共享策略, 并展望该领域的未来研究问题。

关键词: 认知无线电; 无线局域网; 认知 Wi-Fi 2.0; 动态频谱接入

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0071-10

Cognitive Wi-Fi 2.0 networks: future intelligent WLAN

YANG Chun-gang, XU Chao, SHENG Min, LI Jian-dong, LI Hong-yan

(The State Key Lab of ISN, Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: One typical deployment scenario was described and several key techniques including channel bonding were introduced. More importantly, a two-tire dynamic spectrum access model was formulated from both the economic and technologic perspectives. In addition, a variety of dynamic resources sharing schemes were summarized. Furthermore, classic game theoretic models were discussed and consequently strategic design of dynamic spectrum access and intelligent network selection were introduced. Finally, a spectrum sharing scheme was proposed and the future of cognitive Wi-Fi 2.0 networks was looked to.

Key words: cognitive radio; WLAN; cognitive Wi-Fi 2.0; dynamic spectrum access

1 引言

多样和高速的业务需求、日益激化的无线频谱资源需求与稀缺的频谱资源矛盾等成为无线通信系统发展的趋势之一^[1]。然而, 当前固定频谱分配

机制导致多数频谱资源未被充分利用。根据美国联邦通信委员会公布的数据, 大部分已分配频谱的利用率仅在 15%~85%^[2]。为了弥补频谱稀缺与低效利用的矛盾现状, 开采和利用频谱白空成为一种具有前途的通信模式^[3]。认知无线电技术^[4]是该通信模

收稿日期: 2012-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231008, 61201139, 60972048); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8012); 陕西省科技研究与发展计划基金资助项目(2011KJXX-40); 中央高校基本业务费基金资助项目(K5051201033); 综合业务数字网国家重点实验室基金资助项目(ISN02080001); 111 基地专项基金资助项目(B08038); 长江学者创新团队基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61231008, 61201139, 60972048); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320404); The Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province (2012JQ8012); The Science and Technology Research Development Program of Shaanxi Province (2011KJXX-40); The Fundamental Research Funds of The Central Universities (K5051201033); The Special Research Fund of State Key Laboratory (ISN02080001); The Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B08038); The Program of Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University

式得以成功应用的关键技术。认知无线电技术得到学术界、标准界的广泛关注。IEEE 802.2 标准对运行在广播电视频段的无线广域网络进行规范,使其在保证电视用户性能的前提下,利用认知无线电技术择机利用广播电视白空^[7]。针对异构网络环境,IEEE P1900 系列标准基于认知无线电技术,利用网络和终端的可重构性提升频谱资源利用率。随着认知无线电技术的进一步发展,认知雷达^[8]、绿色认知无线网络^[9]、认知家庭基站网络^[10]以及认知网络^[11]也逐渐成为研究热点。认知的思想和理念也在无线局域网中得以延伸。

认知 Wi-Fi 2.0 网络是基于认知无线电技术,工作于授权频段的类似于传统 Wi-Fi 系统的无线局域网。它利用授权频段的良好传播特性,为用户提供更好的服务以及更大的覆盖范围^[15-17]。作为认知无线电技术与 Wi-Fi 技术的结晶,认知 Wi-Fi 2.0 网络具有广泛的研究及应用前景,得到学术界^[15-19]和标准界(IEEE 802.11 af TG)^[20,21]的共同关注。

认知 Wi-Fi 2.0 网络的研究处于起步阶段。本文针对其典型布设场景,总结其特有的关键技术,提出一种双层的动态频谱接入模型作为参考。基于该模型,分别讨论了动态频谱接入过程中的技术相关行为和经济相关行为,同时,给出一种结合技术与经济收益的频谱共享策略。最后,总结认知 Wi-Fi 2.0 网络面临的关键技术问题。本文旨在给大家提供一种启示性研究思路,使该问题得到广泛关注。

2 典型工作场景和关键技术

2.1 典型工作场景

认知 Wi-Fi 2.0 网络未来成功商用必然有广阔的应用空间,本文只关注一种典型布设场景,如图 1 所示^[15-21]。图 1 中,频谱拥有者拥有授权频段,并为主服务提供商分配频谱资源。主服务提供商利用获得的频谱向主用户提供服务。次级服务提供商从频谱拥有者处获得频谱空洞并为认知无线电用户提供服务;次级服务提供商与认知无线电用户均为次级用户。

不同的认知系统和授权频带场景下,频谱拥有者、主服务提供商、主用户、次级服务提供商和认知无线电用户分别由不同的通信实体构成。例如,在广播电视频段(470~863 MHz),根据相关规定^[7],频谱拥有者为 FCC;主服务提供商为广

播电视塔;主用户包括 2 类:广播电视服务或无线麦克风的使用户和次级服务提供商的接入用户;而认知无线电用户指的是与接入点关联的用户。

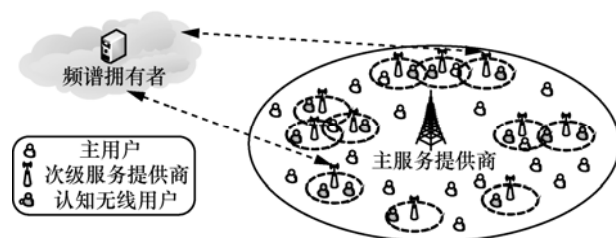


图 1 认知 Wi-Fi 2.0 网络布设场景示意

2.2 关键技术问题

与传统认知无线网络相同,频谱感知^[22]与动态频谱接入^[23,24]是认知 Wi-Fi 2.0 网络需要解决的 2 个关键问题。为了后向兼容传统 Wi-Fi 系统,认知 Wi-Fi 2.0 网络需要使用较宽的频带资源(例如,兼容 IEEE 802.11a/g 系统需使用 20MHz 频带)。然而,传统授权频带上很少有如此宽的连续空洞。因此,认知 Wi-Fi 2.0 网络中存在 2 个关键技术问题: 1) 如何高效地感知如此宽的频带; 2) 如何使用不连续的频谱空洞。此外,从频谱收益的角度,采用经济学的思想、模型和分析方法等,探索更加智能和灵活的频谱共享和接入等关键技术也至关重要。

2.3 信道捆绑和频谱感知

电视频道带宽为 6MHz,若 IEEE802.11af 系统所需带宽为 20MHz,其至少需要 4 个连续的电视频道。然而,由于主用户的存在,广播电视白空具有频带分裂特性^[20,21]。文献[20]提出利用信道捆绑(CB, channel bonding)技术,通过在非空电视频道插入虚拟子载波处理该特性,如图 2 所示。在利用 CB 技术的基础上为了提升频谱检测效率,文献[19]提出一种新的检测技术,它要求认知 AP 使用的频带与电视频道有相同的中心频率。于是,为获得 20MHz 带宽,认知 AP 需要使用 5 个电视频道,导致频谱资源浪费。

另外,认知 Wi-Fi 2.0 网络中的频谱感知也是关键技术之一。过去的 20 多年中,随着认知无线电及其网络技术的发展,对于频谱感知的研究日趋成熟,例如,能量感知、循环统计量、小波检测和新近的研究热点一面向宽频段的压缩感知等^[22]。由于硬件对采样速率的限制,基于奈奎斯特速率采样的

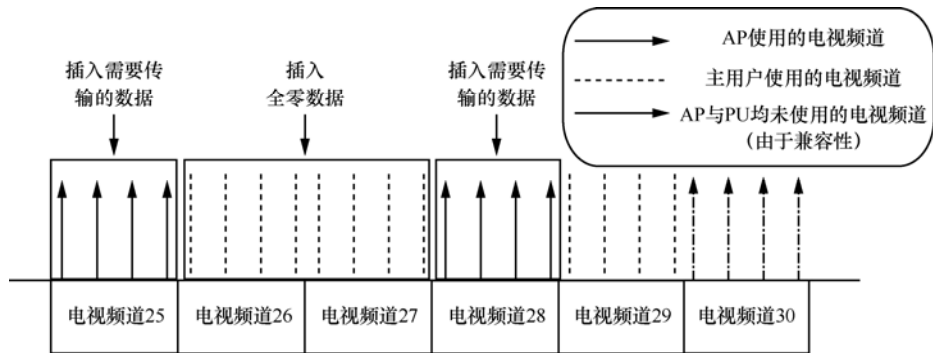


图 2 信道捆绑示意

感知技术，如能量检测与循环平稳检测，一次仅能感知一个信道。在带宽比较大的情况，需要多个射频前端或通过逐个扫描信道进行检测，增加了感知的复杂度、增长了感知时间。而压缩感知技术采用低于奈奎斯特的频率进行采样一次可对很宽的信道进行感知，且其复杂度适中。由于认知 Wi-Fi 2.0 网络需要使用较大的频带宽度(最大 20MHz)，因此为了降低频谱感知所需时间、保证检测结果的时效性，采用压缩感知技术进行频谱感知是一种比较好的选择。由于各种频谱感知技术已经成熟，且对于特定频段的频谱感知已经有样机开发成功。因此，本文关注“认知环”^[4]的下一阶段：高效地开发和利用频谱白空和灰空。

3 动态频谱接入模型

本节提出一种双层动态频谱接入模型，并且从频谱的技术特性和经济收益特性出发，总结已有的动态资源共享策略。

根据认知 Wi-Fi 2.0 网络的典型布设场景，频谱拥有者与次级服务提供商分别通过出售和使用频谱空洞最大化自身收益，认知无线电用户则希望获得最优的服务体验，因此，次级服务提供商需要在服务质量与收取费用之间进行权衡。作为动态频谱接入模型中的一类，私有公用模型^[23]允许频谱拥有者将频谱空洞实时租借给次级用户，并对次级用户的频谱使用行为进行约束。利用该模型，一方面频谱拥有者可以获得一定的经济收益，另一方面频谱租借者可以得到更好的服务质量(例如，不用担心频谱感知差错)，实现双赢。因此，私有公用模型更加适合实现认知 Wi-Fi 2.0 网络中的动态频谱接入^[15]。

基于私有公用模型，本文提出一种适用于认知 Wi-Fi 2.0 网络的双层动态频谱接入模型。本文将认知 Wi-Fi 2.0 网络中实体间的主要行为分为 2 类：与

技术相关的行为以及与经济有关的行为，前者包括对次级服务提供商与认知无线电用户发射功率的控制和空闲信道评估门限的调整、频谱切换与认知无线电用户的接纳控制等；后者包括频谱的拍卖、频谱的定价以及频谱的讨价还价等。除此之外，作为认知无线网络，认知 Wi-Fi 2.0 网络需要处理次级用户与主用户之间的共存问题。因此，频谱拥有者需要对次级服务提供商和认知无线电用户进行约束，其间存在一些与政策相关的行为。例如，在广播电视频段，电视频段设备为次级用户，FCC 对其最大发射功率以及是否应具备定位能力等属性均进行了规范^[7]。在授权频带，与政策相关的行为通常是由频谱拥有者或第三方授权组织事先拟定好的、不能改变的。因此，在描述认知 Wi-Fi 2.0 网络的动态频谱接入时，不讨论该行为，并将模型描述为图 3 所示的双层架构。

图 3 中，频谱拥有者与次级服务提供商之间仅存在与经济相关的行为，次级服务提供商与认知无线电用户之间同时存在经济相关与技术相关行为。次级服务提供商(认知无线电用户)的目标为最大化自身收益，其间可能存在竞争或者合作。称次级服务提供商间的竞争(合作)为 Inter-次级服务提供商竞争(合作)；称关联同一个次级服务提供商的认知无线电用户间的竞争(合作)为 Intra-次级服务提供商竞争(合作)。为高效地利用频谱资源，多址接入协议不可或缺，其规范了实体间的竞争以及协作。例如，传统 Wi-Fi 系统使用 CSMA/CA 协议协调节点对媒质的使用。为保证后相兼容，认知 Wi-Fi 2.0 网络的介质访问控制(MAC, media access control)层可以选择使用 CSMA/CA 协议，也可以根据实体间的竞争和协作，提出更加高效的智能频谱共享机制。

本节首先给出技术行为和经济行为在现有 Wi-Fi 系统以及认知无线网络中的应用，然后针对认知

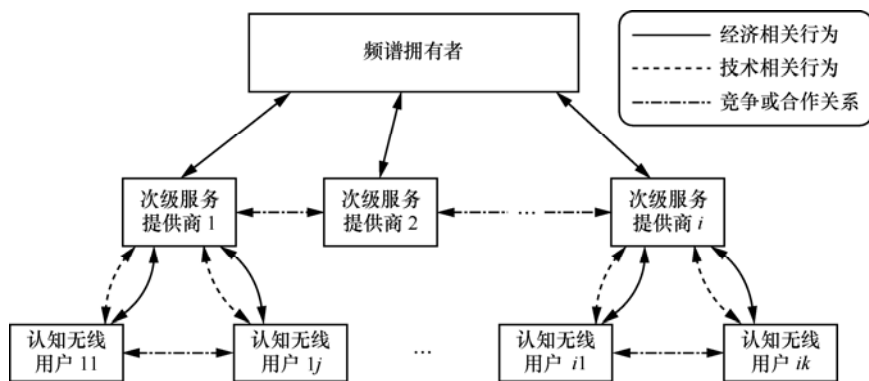


图 3 认知 Wi-Fi 2.0 网络动态接入模型

Wi-Fi 2.0 网络，对 2 种行为进行有机整合，提出一种频谱共享策略。

3.1 认知 Wi-Fi 2.0 网络中的频谱共享技术

认知 Wi-Fi 2.0 网络中与技术相关的行为，有些在传统 Wi-Fi 系统中已被广泛研究，例如，发射功率与空闲信道评估门限控制；还有些并非传统 Wi-Fi 系统中的研究热点，甚至未被研究过，例如，频谱切换与用户的接纳控制。下面结合已有文献，给出与这些行为相关的频谱共享技术。

3.1.1 发射功率与空闲信道评估门限控制

与传统 Wi-Fi 系统相同，认知 Wi-Fi 2.0 网络属于一种无规划、无管理的无线系统，随着广泛布设，子网间会产生严重的相互干扰^[25]。为了提升系统整体性能(例如，吞吐量)，需要控制节点的数据发送行为。总体来说控制分为 3 类：控制发射功率^[25]、控制空闲信道评估门限^[26,27]、对前两者进行联合控制^[28,29]。

传统 Wi-Fi 系统中，功率控制多从节能角度出发^[30,31]，文献^[25]为提升数据传输速率，提出 PERF 算法，在降低 AP 传输功率的同时使用户与 AP 之间可以使用最大传输速率。从网络整体看，该算法并非最优。于是，文献^[26]通过研究不同调制编码方式对信噪比的需求，给出了不同数据速率对应的最优空闲信道评估门限。Mhatre V P 与 Papagiannaki K^[27]基于此研究了可用正交信道数对最优空闲信道评估门限的影响，并给出了 AP 密度与最优空闲信道评估门限之间的关系。为进一步限制节点间干扰，文献^[28]联合调整节点发射功率和空闲信道评估门限，并要求两者的乘积为定值。文献^[29]通过对功率和空闲信道评估门限进行联合优化，一方面防止节点的“吞吐量饿死”现象，另一方面在提升系统吞吐量的同时降低了节点平均发

射功率。

3.1.2 频谱切换

当次级用户发现其使用的信道状况变差或主用户出现时，需要停止数据传输，并在选择新的可用信道后，重新传输数据，该过程被称为频谱切换^[32]。认知 Wi-Fi 2.0 网络在运行过程中同样需要执行该过程^[18]。

在对认知无线网络的研究中，存在一些与频谱切换相关的工作^[33-35]。文献^[33]提出次级用户可以通过为频谱切换预留信道，根据吞吐量需求，对业务的强制中断概率和阻塞概率进行均衡。Chen S Y 等^[34]将跨层设计引入认知 LTE 网络，联合考虑了频谱切换及基站切换，一方面最小化了期望传输时间，另一方面降低了基站切换概率。与触发式频谱切换^[33,34]不同，文献^[35]在认知无线 ad hoc 网络中，根据信道使用状况的统计信息，提出了一种主动的频谱切换策略，并证明与触发方式相比，主动切换能够增大吞吐量、降低节点碰撞概率。

除以上研究外，Kim H 与 Shin K G 首次在认知 Wi-Fi 2.0 网络中提出了一种新的频谱切换概念—用户驱逐^[19,21]。当主用户重新使用部分资源后，新的频谱空洞可能无法保证全部次级用户的服务质量(QoS, quality of service)需求(例如，吞吐量)。此时，次级服务提供商需要通过驱逐部分低优先级的次级用户，以保证高优先级次级用户的 QoS。

3.1.3 接纳控制

接纳控制问题是无线通信系统中的一个经典问题^[36-38]，而在传统 Wi-Fi 系统中由于所有用户是平等的，通常并不会考虑该问题。然而根据文献^[35]对 IEEE 802.11 系统饱和和吞吐量的分析，用户的盲目接入(例如，根据信号强度)可能会导致系统中用户性能急剧下降，进而影响次级服务提供商的经济

收益以及认知无线电用户的业务体验。因此, Kim H 与 Shin K G 提出应该将用户的接纳控制引入认知 Wi-Fi 2.0 网络^[19,21]。

3.2 认知 Wi-Fi 2.0 网络中的博弈理论应用

认知 Wi-Fi 2.0 网络中, 与次级服务提供商效用相关的主要参数除了其为认知无线电用户提供的 QoS(记为 Q)外, 还有其付出的信道租用开销(记为 L)以及其向认知无线电用户收取的服务费用(记为 C)。为最大化自身效用, 次级服务提供商需要同时兼顾 Q 、 L 和 C 。3.1 节中讨论的一些频谱共享技术会影响 Q , 而 L 和 C 则与系统中一些经济行为相关。作为研究智能的理性决策者(博弈论中称为局中人)冲突与合作行为的数学工具, 博弈论能够很好地描述决策者之间的一些经济学行为^[39]。因此, 在研究认知无线网络中的资源共享问题时, 博弈论也成为了一类有效的工具^[40]。

本节将从经济学的角度, 探讨多种经典的非协作博弈模型及协作博弈模型在提升系统资源利用率方面的应用, 并刻画认知 Wi-Fi 2.0 网络中智能的决策行为。

3.2.1 非协作博弈

当局中人之间不存在合作关系时, 该局势被称为非协作博弈。非协作博弈与经济学相结合的重要产物是寡头垄断与拍卖, 下面分别介绍这 2 类模型在认知无线网络中的应用。

1) 寡头垄断

当市场上的竞争者(例如, 公司)数目有限时, 其对产品的需求量(定价)将决定市场上商品的价格(供货量), 这样的市场被称为寡头垄断。根据主用户与次级用户之间的频谱供求关系, 寡头垄断模型被广泛用于研究认知无线网络中的资源共享问题^[41-46]。文献[41]将单一主用户与多个次级用户间的频谱共享问题建模为古诺博弈模型。频谱价格 $c(\mathbf{B})$ 与频谱需求量间的关系可表示为

$$c(\mathbf{B}) = x + y \left(\sum_{b_i \in \mathbf{B}} b_i \right)^\tau \quad (1)$$

其中, 集合 $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 表示各次级用户对频谱的需求量, x , y 和 τ 为非负常数, 其中, $\tau \geq 1$ 。次级用户 i 的效用被表示为

$$\pi_i(\mathbf{B}) = r_i k_i b_i - b_i c(\mathbf{B}) \quad (2)$$

其中, r_i 为单位传输速率为其带来的收益, k_i 为其获得的传输速率。该模型的纳什均衡解(非协作博弈

的经典解概念)^[39]可以通过求解方程组(3)得到。

$$\partial \pi_i / \partial b_i = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, L, N\} \quad (3)$$

有时寡头需要通过定价吸引顾客而获得更大的利润, 此过程可用伯特兰博弈模型描述。文献[42]利用该模型分析了认知无线网络中多个主用户的最优定价机制。为描述用户满意度随速率增长而呈现的饱和特性并便于分析, 使用二次函数来描述次级用户整体的效用。

$$U(\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^N u_i^0 b_i - 0.5 \left(\sum_{i=1}^N b_i^2 + 2v \sum_{j \neq i} b_i b_j \right) - \sum_{i=1}^N p_i b_i \quad (4)$$

其中, 集合 $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 表示各主用户提供的频谱资源数量; u_i^0 表示对于次级用户整体而言, 主用户 i 所提供频谱的单位价值; $v \in [-1, 1]$ 为一个常数, 被用来描述对于次级用户而言使用频谱时的可替换性次级用户; p_i 表示主用户 i 为单位频谱资源所定价格。最优价格可通过求解方程组(5)得到。

$$\partial U(\mathbf{B}) / \partial b_i = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, L, N\} \quad (5)$$

与前 2 类模型不同, 斯坦伯格博弈模型允许局中人的行动具有先后顺序: 先行动的被称为领导者, 后行动的被称为跟随者。文献[43]在 CDMA 机制下, 研究了服务提供商对次级用户上行功率的最优定价问题。一方面服务提供商希望最大化其收益为

$$\max_{\lambda} R(\lambda, \mathbf{p}) = \max_{\lambda} \sum_{i=1}^N \lambda_i p_i \quad (6)$$

其中, $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ 与 $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 分别表示各次级用户使用的上行传输功率以及使用单位功率需付的费用。另一方面, 次级用户 i 需要选择合适的上行功率, 最大化自身效用 $U_i(\mathbf{p}, \lambda_i)$ 。因此, 两者的策略之间存在影响。将服务提供商和次级用户分别作为领导者和跟随者, 利用反向归纳法可得到该问题的纳什均衡解。

当次级用户为 AP 或 BS 时, 其需要为用户提供服务并收取费用, 该场景可描述为一个 2 级市场^[44,45]。文献[44]中存在 2 个次级服务提供商, 次级服务提供商一方面从频谱所有者处租赁频谱, 另一方面通过制定服务价格吸引用户。次级服务提供商与频谱所有者之间的频谱租赁关系被建模为古诺博弈模型; 次级服务提供商的定价行为被建模为伯特兰博弈模型。Duan L 等^[45]提出了一种包括频谱侦听、租借以及定价的最优投资机制。其被描述为一个四阶

段的斯坦伯格博弈模型: 1) 次级服务提供商决定需要侦听带宽 B_s ; 2) 次级服务提供商决定需要租用带宽 B_L ; 3) 次级服务提供商为频谱定价; 4) 认知用户决定所需频带总量。反向归纳法可被用于求解该问题。

2) 拍卖

在市场上, 当出售者不清楚商品价值, 并且商品价值是购买者的私有信息时, 拍卖是一个常用手段。拍卖主要由拍卖者、竞拍者以及拍卖规则组成^[46]。

早在 1994 年 FCC 便开始通过拍卖销售频谱资源^[47]。信道的无线特性使同一频谱空洞对不同次级用户可能有不同价值(例如, 信道容量), 且该价值是次级用户的私有信息, 因此, 主用户可以对频谱空白进行拍卖^[48-50]。文献[48]在考虑认知用户间相互干扰的情况下, 给出了一种实时的频谱拍卖架构。其指出了最大化收益及频谱利用率, 主用户需要根据资源的有效性以及需求量为资源定价。拍卖过程中, 拍卖者与竞拍者为了提升自身的收益可能存在欺骗或共谋, 而文献[48]并未考虑这些行为。文献[49]提出一种双向拍卖机制, 利用该机制在提升频谱利用率的同时, 可以满足双向拍卖的经济稳定性、诚实性、个体理性以及预算平衡性。文献[50]认为能够忽略相互干扰的次级用户可共享同一频谱空洞。据此, 其提出了一种多赢家的频谱拍卖机制, 该机制能够抵抗次级用户的共谋行为。此外, 其通过对原问题进行半正定规划松弛, 使该机制可用于较大规模的认知无线网络。

3.2.2 协作博弈

非协作博弈中的纳什均衡解往往不具备有效性^[39], 为了提升资源利用率, 协作博弈成为研究认知无线网络中频谱共享问题的另一种数学模型。博弈局势中, 局中人全体组成的集合被称为大联盟, 而该集合的一个非空子集被称为一个联盟。若局中人的协作行为只能发生在大联盟中, 该局势为讨价还价博弈, 否则, 其为联盟博弈。

1) 讨价还价博弈

用 $n = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示局中人集, R^n 的闭凸子集 F 表示局中人的可行支付配置集, 向量 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 表示局中人不合作时的预期支付配置, 且集合 $\{y \in F \mid y_i \geq v_i, \forall i \in n\}$ 非空, 则称 (F, v) 为一个 n 人讨价还价问题。该问题最常用的解概念为纳什讨价还价解(NBS, nash bargaining solution)。

$$\phi(F, v) = \arg \max_{x \in F, x_i \geq v_i} \prod_{i \in n} (x_i - v_i) \quad (7)$$

由于 NBS 能从一定程度上保证解的有效性和公平性^[39], 因此, 常被用于分析认知无线网络中的资源共享问题^[51-53]。文献[51]将频谱空洞上的功率分配问题建模为协作博弈模型, 并证明使用 NBS 进行功率分配, 可以在有效性和公平性之间进行折中。Xu D 等^[52]将认知无线网络中的频谱共享问题建模为一个 2 层市场: 第一层市场中主用户代理向次级用户出售频谱; 第二层市场中次级用户根据自身的业务负载变化进行频谱交易, 这 2 层市场均被描述为讨价还价问题。文献[53]针对使用 OFDM 的认知无线系统, 提出了一种基于 NBS 的信道、功率联合分配机制, 该机制在保证次级用户的 QoS 及公平性的同时, 可最大化系统整体吞吐量。

2) 联盟博弈

根据联盟内部, 效用是否可在局中人之间转换, 联盟博弈可分为 2 类: 可转让效用联盟博弈与不可转让效用联盟博弈。博弈模型中, 不同解概念满足不同公理, 常用的解概念有核心和沙普利值等, 由于篇幅不再赘述, 感兴趣的读者可参考文献[39,54]。下面仅给出 2 类联盟博弈的定义及其在无线网络中的应用^[55-58]。

定义 1 可转让效用联盟博弈。

对于任意联盟 S , 若可用特征函数 $v(S)$ 表示该联盟的价值(S 中所有局中人可得到的效用总量), 则称该特征函数为一个可转让效用联盟博弈, 对于空集 \emptyset , $v(\emptyset) = 0$ 。

定义 2 不可转让效用联盟博弈。

不可转让效用联盟博弈被定义为一个映射 $V(\cdot)$ 。对于任意联盟 S , $V(S)$ 为 R^S 的一个非空闭凸子集, 且 $\{x \mid x \in V(S), x_i \geq v_i, \forall i \in S\}$ 为 R^S 的一个有界子集, 其中,

$$v_i = \max \{y_i \mid y \in V(\{i\})\} < \infty, \forall i \in n$$

节点协作可为通信系统带来增益(例如, 虚拟 MIMO), 然而协作时节点存在开销(例如, 交互信息所需的功率)。文献[55]在研究虚拟 MIMO 为系统吞吐量带来的增益时, 将协作节点的选择问题建模为可转让效用联盟博弈, 并提出一种分布式算法研究了联盟的形成与分解过程。Saad W 等^[56]将次级用户的协作频谱感知建模为不可转让的效用联盟博弈, 同样利用分裂聚合算法对该问题进行分析。

在认知无线网络中，次级用户需要在频谱感知与使用之间进行权衡，例如，感知时间增长，传输时间会相对缩短，文献[57]将该问题建模为联盟博弈，并提出一种分布式算法，使次级用户可以通过加入或者离开联盟以最大化自身效用。

3.3 认知 Wi-Fi 2.0 网络的频谱共享策略

如前所述，可将认知 Wi-Fi 2.0 网络中动态频谱接入过程描述为一个 2 层市场：第 1 层中频谱拥有者将频谱租赁给次级服务提供商；第 2 层中次级服务提供商为认知无线电用户提供服务并收取费用。根据具体场景，可将第 1 层市场中的频谱租赁行为建模为非协作博弈或者协作博弈。2 层市场间的相互影响可用斯坦伯格博弈模型描述，其中，第 1 层为第 2 层的领导者。于是，认知 Wi-Fi 2.0 网络中的频谱共享策略可简单描述为：1) 给定频谱租赁单价 θ_i ，利用第 2 层市场，次级服务提供商 i 根据 Q_i 和 C_i ，将其对频谱的需求(数量以及频段)表示为 θ_i 的函数 $B_i(\theta_i)$ ；2) 在第 1 层市场，频谱拥有者根据次级服务提供商的频谱需求，给出最优的频谱租赁单价 $\theta^* = (\theta_1^*, L, \theta_M^*)$ 。

相较于第 1 层市场，第 2 层市场中不但存在与技术及经济相关的行为，同时还存在复杂的竞争或合作关系，拥有更多值得研究的问题。接下来以 IEEE 802.11af 系统为例，在仅考虑下行传输(AP 到用户)的情况下，给出一种第 2 层市场的频谱共享策略，如图 4 所示。

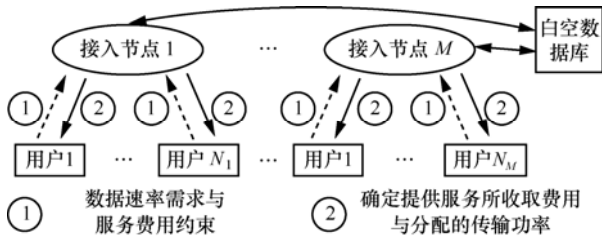


图 4 第 2 层市场的频谱共享策略

由于 AP 对资源的价格及质量存在不同敏感度，因此将其效用表示为

$$u_{AP_i} = \alpha_i \sum_{j=1}^{N_i} (T_j - r_j) + (1 - \alpha_i) \left(\sum_{j=1}^{N_i} r_j c_i - \theta_i B_i \right) \quad (8)$$

其中， $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ，表示 AP $_i$ 对资源质量的重视程度， $\alpha_i = 1$ 表示其只关心资源质量， $\alpha_i = 0$ 则相反； r_j 为与 AP $_i$ 关联的用户 j 的数据速率需求下限； T_j 为用户能获得传输速率上限，在不考虑具体 MAC

机制时，可近似表示为式(9)所示。 c_i 、 θ_i 与 B_i 分别为 AP $_i$ 向用户收取的服务费用、向频谱拥有者付出的频谱租赁单价以及租赁的电视频道数目。

$$T_j = T_j(\mathbf{p}, g_{i,j}, \xi_i, \mathbf{B}) \approx \frac{5B_i}{N_i} \log \left(\frac{g_{i,j} p_i B_i}{n_0 + \sum_{k=1, k \neq i}^M p_k \xi_{i,l} |WS_i \cap WS_l|} \right) \quad (9)$$

式(9)中， $\mathbf{p} = (p_1, L, p_M)$ 为单位信道上各 AP 的发射功率；用 j 表示与 AP $_i$ 关联的第 j 个用户，则 $g_{i,j}$ 表示两者之间的信道状态； $\xi_i = (\xi_{i,L}, \xi_{i-1}, \xi_{i+1}, \xi_M)$ 为 AP $_i$ 与其他 AP 间的信道状态； $\mathbf{B} = ((B_i, WS_i), L, (B_M, WS_M))$ 为 AP 的广播电视白空配置，其中， B_i 与 WS_i 分别为 AP $_i$ 使用的广播电视白空数目及编号(集合)； $|WS_i \cap WS_l|$ 为两集合中相同元素的个数。

$$\begin{aligned} \max U &= \max \sum_{i=1}^M u_{AP_i} \\ \text{s.t. } T_j &\geq r_j \\ c_j &\leq \bar{c}_j \end{aligned} \quad (10)$$

图 4 中的白空数据库可以作为次级服务提供商的控制中心，若系统目标为最大化 AP 整体效用，如式(10)所示，则频谱共享策略如下。

1) 与 AP $_i$ 关联的用户 j 初始化 $r_j / \text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $\bar{c}_j / \text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $j = 1, L, N_i$ ， $i = 1, L, M$ 。AP $_i$ 初始化 $c_i / \text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $p_i mW / TVCH \cdot s$ ， $i = 1, L, M$ 。WSD 初始化 \mathbf{B} 。

2) AP $_i$ 获得 $g_{i,j}$ 以及 ξ_i ， $j = 1, L, N_i$ ， $l, i \in \{1, L, M\}, l \neq i$ ，并将其连同 1) 中的初始化信息发送给 WSD。

3) WSD 根据 \mathbf{p} 和 \mathbf{B} ，利用式(8)、式(9)和式(10)，给出最优服务费用组合 $\mathbf{c}^* = (c_1^*, L, c_M^*)$ 。

4) WSD 根据 \mathbf{c}^* 和 \mathbf{B} ，利用式(8)、式(9)和式(10)，得到最优发射功率组合 \mathbf{p}^* 。

5) WSD 根据 \mathbf{c}^* 以及 \mathbf{p}^* ，利用式(8)、式(9)和式(10)，得到最优广播电视白空配置 \mathbf{B}^* 。

6) 重复 3)~5) 直至 \mathbf{c}^* 、 \mathbf{p}^* 及 \mathbf{B}^* 收敛。

注：IEEE 802.11af 系统中 AP 可用的电视频道数目有限，因此 5) 可以通过遍历搜索得到最优解，并且该策略收敛。

若次级服务提供商属于不同运营商,而每个次级服务提供商的目标均为最大化自身效用。此时,次级服务提供商可通过智能学习和分布式实现频谱共享,方法与集中式类似。

4 面临的挑战

在看到认知 Wi-Fi 2.0 网络美好前景的同时,需要正视其面临的挑战。首先,与传统 Wi-Fi 系统类似,当认知 Wi-Fi 2.0 网络大规模商用后,子网间会存在相互干扰。由于其所工作频段一般具有低损耗、高穿透特性,因此,在高密度部署时,干扰问题尤为严重。其次,在未来,认知 Wi-Fi 2.0 网络可能会与其他认知系统共享同一授权频段,不同系统之间存在相互干扰,例如,IEEE802.11af 系统与 802.22 系统^[58]。因此,共存机制和共享策略的设计将是另一个问题。最后,无线通信接入多元化的发展趋势将导致认知 Wi-Fi 2.0 网络与一些主流系统(例如,4G 系统,甚至 5G 系统)共存。认知 Wi-Fi 2.0 网络如何提升竞争力并脱颖而出,也是标准制定者以及设备制造商需要考虑的一个重要问题。

5 结束语

关注新型的认知 Wi-Fi 2.0 网络,总结了其典型的布设场景和特有的关键技术。提出了一种双层的动态频谱接入模型。基于此模型,一方面讨论了发射功率与空闲信道评估门限控制、频谱切换以及接纳控制等技术在动态频谱接入中的应用;另一方面,从经济学角度讨论了经典的非协作博弈模型与协作博弈模型在智能频谱共享中的应用;同时,为认知 Wi-Fi 2.0 网络提出了一种兼顾技术特性和经济收益特性的频谱共享策略。最后,展望了该领域在未来研究中将面临的一些问题及可行的研究方向。

参考文献:

- [1] FURUSKAR A, ZANDER J. Multiservice allocation for multiaccess wireless systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1):174-184.
- [2] FCC. ET Docket No 03-222 Notice of Proposed Rule Making and Order[R]. 2003.
- [3] AKYILDIZ I, ALTUNBASAK Y, FEKRI F. AdaptNet: an adaptive protocol suite for the next-generation wireless Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(3):128-136.
- [4] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.
- [5] CORDEIRO C, CHALLAPALI K, BIRRU D. IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios[A]. IEEE DySPAN[C]. Baltimore, MD, USA, 2005. 328-337.
- [6] MUCK M, BULJORE S, MARTIGNE P. IEEE P1900.B: coexistence support for reconfigurable, heterogeneous air interfaces[A]. IEEE DySPAN[C]. Dublin, Ireland, 2007. 381-389.
- [7] SUM C S, HARADA H, KOJIMA F. Smart utility networks in TV white space[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7):132-139.
- [8] HAYKIN S. Cognitive radar: a way of the future[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1):30-40.
- [9] GUR G, ALAGOZ F. Green wireless communications via cognitive dimension: an overview[J]. IEEE Network, 2011, 25(2):50-56.
- [10] GUR G, BAYHAN S, ALAGOZ F. Cognitive femtocell networks: an overlay architecture for localized dynamic spectrum access[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(4):62-70.
- [11] MANOJ B S, RAO R R, ZORZI M. Cognet: a cognitive complete knowledge network system[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(6):81-88.
- [12] PERAHIA E. IEEE 802.11n development: history, process, and technology[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(7):48-55.
- [13] NEE R V. Breaking the gigabit-per-second barrier with 802.11ac[J]. IEEE Wireless Communication, 2011, 18(2):4.
- [14] HARDIN G. The tragedy of the commons[J]. Journal of Natural Resources Policy Research, 2009, 1(3):243-253.
- [15] CHEN H S, GAO W. MAC and PHY proposal for 802.11af[EB/OL]. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/10/11-10-0258-00-00af-mac-and-p-hy-proposal-for-802-11af.pdf>, 2010.
- [16] TV white spaces workshop. IEEE P802.11af: a regulatory primer [EB/OL]. http://iee802.org/19/pub/Workshop/4_Kennedy-RIM.pdf, 2010.
- [17] NANAVAT K S. Channel Bonding/Loading For TV White Spaces in IEEE 802.11af[D]. San Diego, USA: San Diego State University, 2012.
- [18] BAHL P, CHANDRA R, MOSCIBRODA T. White space networking with Wi-Fi like connectivity[A]. ACM SIGCOMM[C]. Barcelona, Spain, 2009. 27-38.
- [19] KIM H, SHIN K G. Understanding Wi-Fi 2.0: from the economical perspective of wireless service providers dynamic spectrum management[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(4):41-46.
- [20] KIM H, CHOI J, SHIN K G. Wi-Fi 2.0: price and quality competitions of duopoly cognitive radio wireless service providers with time-varying spectrum availability[A]. IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011. 2453-2461.
- [21] KIM H, SHIN K G. Admission and eviction control of cognitive radio users at Wi-Fi 2.0 hotspots[J]. IEEE Transactions on Mobile

- Computing, 2012, 11(11):1666-1677.
- [22] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1):116-130.
- [23] BUDDHIKOT M M. Understanding dynamic spectrum access: models, taxonomy and challenges[A]. *IEEE DySPAN[C]*. Dublin, Ireland, 2007. 649-663.
- [24] SONG M, XIN C S, ZHAO Y X. Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(1):23-29.
- [25] AKELLA A, JUDD G, SESHAN. Self-management in chaotic wireless deployments[J]. *Springer Wireless Networks*, 2007, 13(6):737-755.
- [26] ZHAI H, FANG Y G. Physical carrier sensing and spatial reuse in multirate and multihop wireless ad hoc networks[A]. *IEEE INFOCOM[C]*. Barcelona, Spain, 2006. 1-12.
- [27] MHATRE V P, PAPAGIANNAKI K. Optimal design of high-density 802.11 WLANs[A]. *ACM CoNEXT[C]*. Lisbon, Portugal, 2006.
- [28] FUEMMELE J, VAIDYA N, VEERAVALLI V V. Selecting Transmit Powers and Carrier Sense Thresholds for CSMA Protocols[R]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [29] MHATRE V P, PAPAGIANNAKI K, BACCELLI F. Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs[A]. *IEEE INFOCOM[C]*. Anchorage, Alaska, USA, 2007. 535-543.
- [30] QIAO D, CHOI S, JAIN A. Adaptive transmit power control in IEEE 802.11a wireless LANs[A]. *IEEE VTC[C]*. Seoul, Korea, 2003. 433-437.
- [31] JUNG E S, VAIDYA N H. A power control MAC protocol for ad hoc networks[J]. *Springer Wireless Networks*, 2005, 11(1-2):55-66.
- [32] WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1):5-23.
- [33] ZHU X, SHEN L, YUM T S P. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(4):304-306.
- [34] CHEN Y S, CHO C H, YOU I. A cross-layer protocol of spectrum mobility and handover in cognitive LTE networks[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19(8):1723-1744.
- [35] SONG Y, XIE J. Proactive spectrum handoff in cognitive radio ad hoc networks based on common hopping coordination[A]. *IEEE INFOCOM[C]*. San Diego, CA, USA, 2010. 1-2.
- [36] NAGHSHINEH M, SCHWARTZ M. Distributed call admission control in mobile/wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(4):711-717.
- [37] FANG Y, ZHANG Y. Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2002, 51(2):371-382.
- [38] AHMED M H. Call admission control in wireless networks: a comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2005, 17(1):50-69.
- [39] MYERSON R B. *Game Theory: Analysis of Conflict[M]*. Cambridge, Massachusetts, USA: Harvard University Press, 1997.
- [40] WANG B, WU Y, LIU K J R. Game theory for cognitive radio networks: an overview[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(14):2537-2561.
- [41] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7):2651-2660.
- [42] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1):192-202.
- [43] DAOUD A A, ALPCAN T, AGARWAL S. A stackelberg game for pricing uplink power in wide-band cognitive radio networks[A]. *IEEE CDC[C]*. Cancun, Mexico, 2008. 1422-1427.
- [44] JIA J, ZHANG Q. Competitions and dynamics of duopoly wireless service providers in dynamic spectrum market[A]. *ACM Mobi Hoc[C]*. Hong Kong, China, 2008. 313-322.
- [45] DUAN L, HUANG J, SHOU B. Cognitive mobile virtual network operator: investment and pricing with supply uncertainty[A]. *IEEE INFOCOM[C]*. Phoenix, AZ, USA, 2010. 1-9.
- [46] KRISHNA V. *Auction Theory[M]*. New York: Academic Press, 2009.
- [47] BAJARI P, YEO J. Auction design and tacit collusion in FCC spectrum auctions[J]. *Information Economics and Policy*, 2009, 21(2):90-100.
- [48] GANDHI S, BURAGOHAIN C, CAO L. A general framework for wireless spectrum auctions[A]. *IEEE DySPAN[C]*. Dublin, Ireland, 2007. 22-33.
- [49] ZHOU X, ZHENG H. TRUST: a general framework for truthful double spectrum auctions[A]. *IEEE INFOCOM[C]*. Rio De Janeiro, Brazil, 2009. 999-1007.
- [50] WU Y, WANG B, LIU K J R. A scalable collusion-resistant multi-winner cognitive spectrum auction game[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(12):3805-3816.
- [51] SURIS J E, DASILVA L A, HAN Z. Cooperative game theory for distributed spectrum sharing[A]. *IEEE ICC[C]*. Glasgow, Scotland, UK, 2007. 5282-5287.
- [52] XU D, LIU X, HAN Z. A two-tier market for decentralized dynamic spectrum access in cognitive radio networks[A]. *IEEE SECON[C]*.

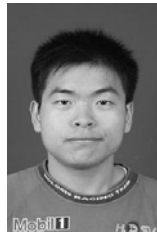
Boston, Massachusetts, USA, 2010. 1-9.

- [53] NI Q, ZARAKOVITIS C C. Nash bargaining game theoretic scheduling for joint channel and power allocation in cognitive radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(1): 70-81.
- [54] SAAD W, HAN Z, DEBBAH M. Coalitional game theory for communication networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(5):77-97.
- [55] SAAD W, HAN Z, DEBBAH M. A distributed merge and split algorithm for fair cooperation in wireless networks[A]. IEEE ICC[C]. Beijing, China, 2008. 311-315.
- [56] SAAD W, HAN Z, DEBBAH M. Coalitional games for distributed collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks[A]. IEEE INFOCOM[C]. Rio De Janeiro, Brazil, 2009. 2114-2122.
- [57] SAAD W, HAN Z, ZHENG R. Coalitional games in partition form for joint spectrum sensing and access in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012, 6(2):195-209.
- [58] GHOSH C, ROY S, CAVALCANTI D. Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in TV white spaces[J]. IEEE Wireless Communication, 2011, 18(4):22-31.

作者简介:



杨春刚 (1982-), 男, 黑龙江肇东人, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为认知无线网络、智能资源管理和博弈论等交叉学科技术在无线网络中的应用等。



徐超 (1987-), 男, 陕西西安人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为认知无线网络资源管理、博弈理论在无线通信网络中的应用等。



盛敏 (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、QoS 保障技术、认知网络等。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信、未来移动通信和未来局域网、大规模 ad hoc 网、软件无线电等。



李红艳 (1966-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为异构网络融合、无线移动自组织网络、无线传感器网络、深空通信网络等。