

# 认知无线网络中频谱分配算法

王钦辉<sup>1,2</sup>, 叶保留<sup>1</sup>, 田 宇<sup>1</sup>, 李文中<sup>1</sup>, 陆桑璐<sup>1</sup>, 陈道蓄<sup>1</sup>

(1. 南京大学软件新技术国家重点实验室, 江苏南京 210046; 2. 南京陆军指挥学院军事训练与管理系, 江苏南京 210045)

**摘 要:** 随着新型无线业务的不断发展, 频谱供需矛盾日益明显. 认知无线网络被认为是实现动态频谱共享、缓解频谱供需矛盾的重要途径, 近年来相关研究受到了广泛关注. 本文对认知无线网络中的频谱分配研究进展进行了分析. 论文首先介绍了认知无线网络的技术背景, 分析了认知无线网络中频谱分配的关键问题和算法设计目标. 在此基础上总结了主流频谱分配模型的设计思想与技术特点, 并详细描述了各模型经典分配算法的实现机制. 最后, 对频谱分配研究趋势进行了展望.

**关键词:** 认知无线网络; 频谱分配; 算法

**中图分类号:** TN911.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0147-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.024

## Survey on Spectrum Allocation Algorithms for Cognitive Radio Networks

WANG Qin-hui<sup>1,2</sup>, YE Bao-liu<sup>1</sup>, TIAN Yu<sup>1</sup>, LI Wen-zhong<sup>1</sup>, LU Sang-lu<sup>1</sup>, CHEN Dao-xu<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Department of Military Training and Management, Army Command College, Nanjing, Jiangsu 210045, China)

**Abstract:** With the explosion of novel wireless applications, the increasing growth of spectrum requirement has outpaced available spectrum resources. Cognitive Radio Network (CRN) has emerged as a promising solution to address the above dilemma by dynamically sharing spectrum among users. Recently, CRN technology has attracted great research interests as well as efforts. In this paper, we review the state-of-the-art of spectrum allocation techniques in CRNs. We first illustrate the technical background of CRNs, and then analyze the key issues in spectrum allocation algorithms design. Following that we review the design rationale and technical feature of typical allocation models, and further investigate the implementation mechanism of classical algorithms for each model. Finally, we envision the possible issues for future work on spectrum allocation.

**Key words:** cognitive radio networks; spectrum allocation; algorithms

## 1 引言

无线频谱是无线通信中的一种有限而珍贵的自然资源. 现有无线通信系统通常采用基于授权的方法分配频谱, 即将无线频谱划分成若干固定宽度的频谱段, 由政府管理部门分配给用户独占使用. 近年来, 随着无线设备数量和无线服务的快速增长, 基于授权的静态分配方式已经难以为新增无线业务分配专用频段. 然而, 实测调查发现, 大部分授权频段大多数时间处于空闲状态, 利用率很低<sup>[1,2]</sup>. 与此同时, 某些未授权频段却因竞争使用而拥挤不堪 (如手机通信频段). 因此, 探索新的频谱资源分配与使用方法势在必行.

认知无线网络<sup>[3,4]</sup>被认为是解决上述困境的有

效解决方案. 该方案中, 获得频段授权的用户称为主用户, 未获得频谱授权的用户称为次用户. 主用户对频谱拥有优先使用权, 可随时使用频谱. 同时, 主用户可将空闲的授权频段出让或租赁给次用户, 使得次用户可共享使用授权频段. 认知无线网络为提高频谱利用率, 缓解频谱供需矛盾提供了可行途径.

认知无线网络的核心问题是, 如何提高次用户对空闲频段及相应频谱环境 (频谱空闲时隙、主用户使用模式等) 的实时感知能力, 并根据用户需求优化空闲频段使用效能. 图1给出了认知无线网络技术研究的层次结构. 在物理层, 认知无线电<sup>[6,7]</sup>是整个网络的基础, 可实时感知频谱环境变化及频谱可用性<sup>[8]</sup>, 从而降低频谱环境对无线技术发展的束缚, 主要研究热点包括频谱

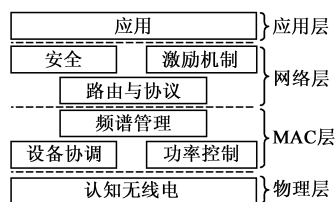


图1 认知无线网络技术研究的层次结构

感知、信道估计和数据传输等。在媒体接入层(MAC)层,设备协同、功率控制和频谱管理是实现频谱资源动态共享的热点问题。设备协同解决用户节点协同问题,以保证节点间有效通信与协作。功率控制通过优化发射功率来减少信道干扰。以设备协同和功率控制为基础,频谱管理负责协调多用户频谱接入问题,以支持多用户共享使用闲置频谱资源。在网络层,由于认知无线网络具有动态、智能等特点,路由及相关协议需满足异步、实时等性能,并能根据网络拓扑结构的动态变化自适应调整服务行为。同时,安全和激励机制也是协议设计需考虑的因素。前者指基于保护主用户权限和基于认知无线电技术而引入的安全隐患,后者以激励主用户开放授权频谱以优化频谱使用效率。最后,如何基于认知无线网络,部署新型无线应用是应用层关注的问题。

频谱管理一直是认知无线网络关注的焦点,其有效性直接影响着频谱利用率。从实现角度看,频谱管理包括频谱检测、频谱决策、频谱共享和频谱移动四个步骤。其中频谱检测用于探测可用频谱并监测主用户的出现,为频谱共享提供资源基础;频谱决策根据用户需求,选择最合适的可用频谱;频谱共享协调多用户共享接入频谱,包括频谱分配和频谱接入两部分,前者通过设计优化算法解决可用频谱的选择问题,后者通过设计控制协议协调多用户对频谱的共享使用;频谱移动支持次用户在必要时空出占用信道(如检测到主用户时),以避免干扰。在频谱管理中,频谱分配决定着共享的合理性与有效性,既关系到次用户的频谱需求能否得到满足,还关系到主用户的收益。频谱检测与频谱决策是频谱分配的基础,影响着分配方法的选择。

## 2 频谱分配

### 2.1 概述

早期网络常采用频分复用等技术将可用频段划分成若干信道,在满足干扰限制的条件分配可用信道,以最大化满足用户需求,该问题也被称为信道指配问题。

认知无线网络中的动态频谱分配问题不同于传统的信道指配问题。信道指配中待指配的可用信道通常是固定不变的;而在认知无线网络中,可用信道是

动态变化的(主用户行为的多变性通常会导致空闲频段变得零碎而大小各异,并且数量会随时间和地理位置的变化而变化),且次用户必须在主用户需要时无条件退让所占信道。认知无线网络中的频谱分配问题可描述为:“如何在满足主用户可抢占式优先使用频谱资源及避免信号干扰的前提下,在主用户与次用户之间建立动态频谱共享机制,有效地将空闲频段分配给次用户,以优化频谱利用效率”。图2结合频谱分配所涉各环节之间的相互影响关系,展示了频谱分配的问题描述。

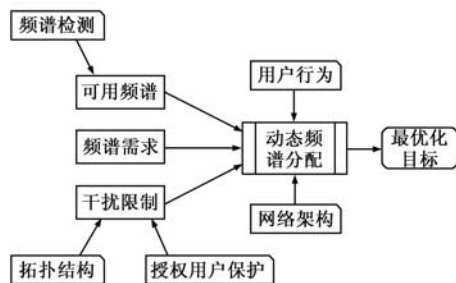


图2 频谱分配问题描述

### 2.2 算法设计目标

理想的分配算法设计应能够最大化频谱利用率或系统吞吐量。但实际中,在最大化频谱利用率的同时,还须权衡考虑其他因素的影响,如公平性、收敛性等。分配算法的设计目标可归纳为以下四点:

**高效性(Spectrum Utilization)** 频谱分配的最终目标是完成对可用频谱的合理分配,使得系统吞吐量和频谱利用率等性能达到最优。

**公平性(Fairness)** 最大化次用户之间的公平性,避免“饿死”情况。高效性与公平性通常难于兼顾,算法设计通常需要在高效性和公平性之间达到某种平衡,使得系统既满足性能要求,又能保证一定公平性。

**有效性(Computational Efficiency)** 算法执行时间是有效性的重要衡量标准。由于可用频谱随时间和地点而变化,频谱分配算法必须对获得的空闲频段做出快速分配响应,保证分配的时效性。因此,频谱分配算法必须考虑降低系统开销及计算量。

**扩展性(Scalability)** 认知无线网络中参与频谱共享的节点数目动态变化,且数量可能很大,因此算法需要具有良好的可扩展性,满足规模的可伸缩性。

## 3 频谱分配方法

### 3.1 基于图论的方法

#### 3.1.1 基本思想

基于图论的分配方法将认知无线网络拓扑结构抽象成无向连接图。其中顶点表示参与分配的次用户;每个顶点有可用信道集合;图的边集则由干扰限制决

定: 当且仅当两用户节点不能同时使用某信道时, 相应顶点用一条边连接. 我们称该图为干扰图 (Conflict Graph)<sup>[9,14]</sup>. 图 3 给出了一个干扰图示例, 图中四个顶点分别代表参与频谱分配的用户, 与顶点关联的集合表示该认知用户可获得的频谱信道 (如 A 节点的可用频谱为 a, b, c 信道), 顶点之间的边表示对应用户不能同时使用相同的信道 (A 节点与 B 节点不能同时使用 a 或 b 信道).

3.1.1.2 典型算法

为简化问题, 通常采用正交技术将可用频谱分割成  $M$  个同构的正交信道,  $N$  个用户竞争信道. Peng 等<sup>[15]</sup>将该问题归约为图染色问题, 即将频谱分配问题等价于从节点的信道集合 (每个信道对应一种颜色) 中选择合适信道 (颜色) 为每个节点染色的图染色问题. 图染色问题的最优解法属于 NP-Hard, 因此设计算法时常采用启发式方法求次优结果<sup>[14]</sup>. 文中提出一种贪婪迭代分配方法. 迭代开始前, 首先根据某种规则为每个节点进行标号, 标号大小表征分配循环阶段顶点的贡献值大小, 每次迭代为标号值最大的节点分配信道 (染色). Peng 等<sup>[15]</sup>针对不同用户需求和不同分配目标提出相应标号准则, 并针对各准则分别提出了合作与非合作算法.

文献<sup>[15]</sup>的算法执行时间随空闲频谱数的增多而增加, 一定程度上不能适应空闲频谱快速时变的要求. Liao 等<sup>[17]</sup>针对上述缺点提出一种改进方法, 使得算法收敛速度得到控制. Liao 等人将干扰图分解成  $M$  个简单图, 每个子图分别表征单个信道的干扰关系. 如图 4 对应于图 3 干扰图的分解子图, 图 4 中的三个信道分别对应原图的一个导出子图 (a) ~ (c). 由于子图都是简单图, 对原图的染色可以简化为对各子图的并行染色. 基于信道正交假设, 对某个信道的使用不会对其他信道造成干扰. 因此, 并行着色算法执行过程中, 各个子图着色相互独立. 实验证明, 该算法可以得到与文献<sup>[15]</sup>相同的分配结果, 但是算法时间开销更少.

针对认知无线网络中网络拓扑及可用信道的时变特性, Hao 等<sup>[16]</sup>提出一种以尽可能最大化系统总带宽、且满足快速收敛性为目标的分配方案. 考虑到不同次用户获得相同信道时对系统总带宽性能影响不同,

作者提出基于这种信道回报异质性优化最大化系统总带宽. 为提高收敛速度, 算法在信道分配的一次迭代过程中尽可能多地将可用信道分配给次用户, 从而通过减少迭代次数来完成一次完整的信道分配过程.

3.1.1.3 小结

表 1 对基于图论的常用算法进行了总结. 基于图论的方法简单易行, 然而其一般假设感知节点对频谱资源的需求无限大, 在某些应用环境 (如空闲信道的变化缓慢而不同节点信道需求相差较大) 可能导致将较多频谱资源被分配给频谱需求量较小的节点, 使得频谱的利用率较低. 基于图论的方法多适用于静态的网络环境, 这意味着拓扑结构的每次改变均需要重新计算分配, 如果拓扑结构变化比较频繁, 则算法的有效性将受到很大挑战.

表 1 基于图论的频谱分配方法小结				
文献	高效性	公平性	有效性	扩展性
Peng 等 <sup>[15]</sup>	A/C	C/A	C	C
Liao 等 <sup>[17]</sup>	A/C	C/A	A	B
Hao 等 <sup>[16]</sup>	B	B	B	B

备注:  $A > B > C$ , 仅代表相对比较意义, A/C 表示 A 或 C, 对应 C/A (“>”表示优于)

3.2 基于频谱交易的分配方法

3.2.1 基本思想

该类方法借鉴商品交易的思想, 将频谱视为商品在用户之间进行交易, 实现频谱在主用户和次用户之间共享. 从经济学角度看, 这种频谱共享方法被称为频谱交易. 提供频谱资源的称为频谱卖家, 需要使用频谱的用户则称为频谱买家. 买家和卖家可直接交易或通过经纪人交易.

3.2.2 典型算法

频谱定价在频谱交易中发挥着重要作用. 对于频谱买家, 价格取决于频谱使用的满意度, 通常使用效用函数来衡量. 对于卖家, 价格决定获益高低, 通常使用利润函数来刻画. 基于频谱交易的分配方法大致可以归纳为以下几种:

**市场均衡 (Market Equilibrium)** 频谱交易中, 需求函数决定买家所需频谱数量, 供应函数决定卖家的频谱数量, 通过价格来协调买卖双方供求关系, 达到市场均衡, 使买家满意度和卖家利润均达到最优. 为协调满意度、利润及价格三者关系, Ileri 等<sup>[21]</sup>利用买家接受模型描述买家满意度与价格之间的关系, 买家以一定概率接受卖家的频谱服务; 通过卖家利润模型来描述卖家利润与价格的关系. 基于需求响应定价将卖家之间的竞争关系描述为非合作博弈. 即从买家角度看, 只有当卖家的定价合理才能被用户接受; 相反, 从卖家角

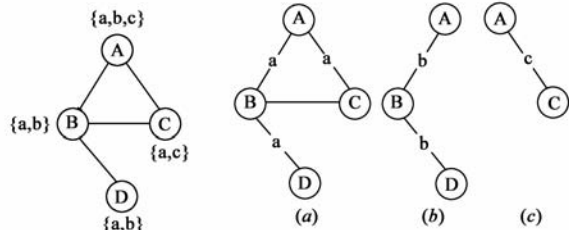


图3 干扰图示例

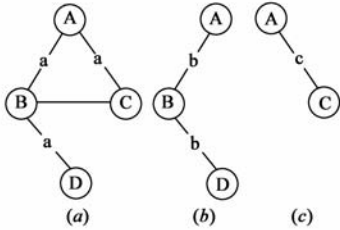


图4 导出子图示例

度看,只有当获得的收益足够才会提供服务.为实现竞价交易,作者提出一迭代投标方法,该方法每次迭代只考虑一个买家,多个卖家通过非合作博弈方式竞争,最终达成交易.实验结果表明,竞争能够提高用户接受服务的概率,并降低卖家收益.另一篇文献[24]根据带宽大小将频谱分级,提出“二次利用”的频频共享机制,即主用户将频谱售给次用户,次用户可将购买到得频谱再转售给其他用户.作者基于该思想,借助多级市场模型建模,利用市场供求平衡求解,使得交易双方利益最大化.然而该方法没有设置次用户频谱需求上限,存在次用户过度占用频谱的情况,因而主用户的 QoS 不能得到保障.针对该问题,文献[22]为每个次用户的占用频谱设置上限,研究受频谱约束的最优价格函数,力求在保证主用户 QoS 的同时,使卖家能获得最大利润.

**优化方法 (Optimization)** 传统优化方法包含一个目标和一组约束条件,通过选择不同技术(如凸优化、线性规划等)来最大化或最小化目标对象.优化方法也可以解决频谱交易问题:可最大化卖家利润、最大化买家效用或最小化共享频谱代价为目标(共享频谱代价指共享频谱对主用户自身传输质量的影响).Gandhi 等<sup>[25]</sup>以最大化卖家利润为目标、以干扰限制为约束条件,利用线性规划对频谱分配进行了分析.由于考虑干扰限制,求解最优结果是一个 NP-Hard 问题.因此,论文对于干扰限制条件作线性化处理,使得可在多项式时间内求得次优(sub-optimal)解.

**议价博弈 (Bargaining Game)** 议价博弈适合双方可互相合作的情形,博弈双方互相影响策略选择.从前文可知,基于图染色的分配算法在网络拓扑每次发生变化时都要重新执行分配.事实上,网络拓扑结构的每次变化可能只发生在局部.因此,若考虑历史分配情况,针对拓扑结构局部变化做局部分配,计算量将大大减少.Cao 等<sup>[12]</sup>基于议价博弈提出一种基于讨价-还价的局部重分配分配方法,其思想是让变化和受变化影响的用户形成一个无冲突的自组织的议价组,让每个组在组内修改频谱分配来提高系统利用率,同时保证组外其他用户不受影响.

**拍卖 (Auction)** 频谱拍卖方法借鉴微观经济学中定价拍卖原理制定频谱资源分配机制.利用拍卖理论分析交易的相关工作较多,将在下节单独介绍.

### 3.2.3 小结

基于频谱交易的方法适用于主用户与次用户之间基于租用关系的应用场景,该方法以定价机制为切入点,基于卖家利润及买家满意度完成交易.从共享的高效性分析,拍卖方法通常优于其他同类方法,这是因为拍卖通常可使卖家获得更多经济利益,其激励更多的主用户开放自己的空闲频谱.从公平性角度分析,拍

卖与市场交易方法更优,这是因为其可以促使卖家之间通过公平定价来共享频谱.从有效性角度,议价博弈方法采用分布式算法,而其他方法常采用集中式算法设计,前者更适合大规模动态频谱共享.

## 3.3 基于频谱拍卖的分配方法

### 3.3.1 基本思想

基于拍卖的频谱分配模型是频谱交易的一种,但交易方式为拍卖.拍卖的一般场景是:卖家将待拍卖商品告知拍卖商,由拍卖商组织拍卖.买家向拍卖商投标,拍卖商则根据某些原则(如利益最大化)确定商品的赢家,并向赢家索要支付.频谱拍卖将频谱拥有者视为卖家,次用户视为买家,基站或接入点则一般充当拍卖商.

### 3.3.2 典型算法

成功的拍卖系统需要满足经济鲁棒性,包括诚信(Truthfulness),事后预算平衡(Ex-post Budget Balance)和个体理性(Individual Rationality)<sup>[29]</sup>.诚信保证不会有买家能通过故意提高或降低出价来提高买家利润,以抵制市场操纵并保证拍卖的公平和有效性.事后预算平衡保证拍卖商有利可图,以此激励拍卖商设置拍卖.个体理性保证诚信投标者的利用率非负,即有利可图,并以此激励用户积极参加拍卖.

与传统拍卖不同,频谱拍卖需考虑干扰限制,使得频谱具有空间复用性.另一方面,频谱拍卖要提供经济鲁棒性和快速的收敛速度以满足有效性.这些要求使得频谱拍卖设计更加困难.传统的拍卖设计要么难以保证诚信,要么需要指数级计算复杂度(且还要考虑干扰限制),要么严重退化频谱利用率,如二次定价频谱拍卖<sup>[34]</sup>和 VCG 型频谱拍卖<sup>[35]</sup>.

Zhou 等<sup>[28]</sup>首次结合考虑计算复杂度和诚信,提出一个贪婪频谱分配算法,并设计基于临界邻居节点投标的定价机制来确保诚信拍卖.其中贪婪频谱分配算法每次为最高出价投标者分配频谱,使得系统可在多项式时间内得到次优利用率.Zhou 等<sup>[28]</sup>虽能保证诚信拍卖,但其分配结果通常导致频谱利用率的退化(如用户投标价格相同时的情况).针对此问题,Wang 等<sup>[33]</sup>引入近似诚信概念,以最大化频谱利用率为目标,同时兼顾诚信,实现诚信与频谱利用率的平衡关系.为最大化拍卖商利润,Jia 等<sup>[32]</sup>以最大化虚拟价值为目标,提出一种估算求解方法,使利润近似最优并保证诚信.上述拍卖均是单向的,即仅对单卖家-多买家进行了分析,并不适于多卖家-多买家的应用场景.为弥补不足,Zhou 等<sup>[29]</sup>将双向拍卖的概念运用到频谱拍卖中,提出双向拍卖中保证卖家和买家诚信投标的算法,该算法满足个体理性和事后收支平衡两个经济属性,进一步提高了频谱利用率.

3.3.3 小结

基于定价拍卖的分配模型一直是频谱分配的热点方法. 频谱拍卖设计注重激励机制的高效性, 其优点是主用户将获得更高的经济利益, 次用户的公平性也有所保证. 表 2 总结了现有一些频谱拍卖系统设计. 事实上, 频谱拍卖设计的高效性通常会使得问题变得更难, 即需要在高效性与有效性之间寻求平衡. 另外, 拍卖公平性已经在传统经济学拍卖中得到验证<sup>[36]</sup>. 但在动态频谱接入场景中存在两种可能: 其一是主、次用户身份预先确定, 主用户获得固定分配频谱, 然后由主用户将频谱通过拍卖分配给次用户; 其二是主用户与次用户身份角色在初始阶段并不确定, 而是在拍卖过程用户通过竞争确定身份. 目前频谱拍卖设计均是针对第一种情形, 尚缺乏对第二种情形的工作. 此外, 满足更多的经济属性(如 collusion-resist)也是拍卖设计进一步工作需关注的问题.

表 2 频谱拍卖设计总结 (✓: 满足的属性; ×: 未满足的属性)

文献	频谱 复用	诚信	事后预 算平衡	个体 理性	网络 规模	计算时间 /结果
Gandhi 等[25]	✓	×	×	×	大	多项式/次优
Ileri 等[21]	×	×	×	×	小	指数/最优
VCG[34]	×	✓	×	✓	小	指数/最优
McAfee[27]	×	✓	✓	✓	小	指数/最优
VERITAS[28]	✓	✓	✓	✓	大	多项式/次优
TRUST[29]	✓	✓	✓	✓	大	多项式/次优
Jia 等[32]	✓	✓	✓	✓	大	指数/最优
ETEX[33]	✓	✓	✓	✓	大	多项式/次优

3.4 基于博弈论的分配方法

3.4.1 基本思想

认知无线网络中节点行为可能是自私和动态的, 动态频谱共享算法需要对此做出相应决策. 博弈论为研究主体行为直接相互作用时的决策均衡提供了决策模型和理论, 为动态频谱共享问题提供了可行思路.

基于博弈论的频谱分配方法将认知用户的实时交互过程映射为博弈模型, 并建立分布式动态频谱共享算法. 该模型使用严谨的数学模型解决认知用户之间利害冲突, 为博弈决策选择提供依据. 基于博弈论的频谱分配方法将认知用户视为博弈玩家, 认知用户的行为集合(通过不同的运行参数刻画不同行为)视为节点的策略集合, 根据优化目标的不同选择合适的效用函数.

3.4.2 典型算法

基于博弈论的频谱分配算法将认知无线电系统中每个节点视作一个智能自治系统. Neel 等<sup>[38,39]</sup>使用潜博弈理论对软件无线电技术的自适应调制机制进行了分析. 其中文献[38]给出了认知无线电中网络中的各种

博弈论模型, 并利用潜博弈模型分析了认知无线电的功率控制, 呼叫准入控制和干扰避免. 文献[39]则分析了认知无线电中各种博弈模型的收敛性.

Cao 等人<sup>[12]</sup>提出了一个议价博弈的分布式分配算法. 通过议价博弈, 使得最优分配无需在每次拓扑结构变化时重新计算. 与此同时, 为考虑算法的公平性, 论文还基于 Feed Poverty 策略设计了博弈算法, 使得算法公平性更好. 但文献[12]中的议价博弈交易框架假设网络节点相互合作, 然而, 实际系统中的节点可能是自私的.

用户行为的自私性使得静态博弈模型难以获得高效的纳什均衡, 重复博弈指重复静态博弈过程, 常被用来分析长期动态频谱共享. 由于需要多次博弈, 重复博弈中的用户可根据历史行为做更为灵活有效的决策. Etkin 等<sup>[40]</sup>针对非合作用户之间的博弈, 运用 Folk 定理<sup>[42]</sup>分析了重复博弈中的效率, 并通过实验证明了在长期动态频谱共享中的高效性.

Nie 等<sup>[41]</sup>利用博弈论对认知无线电的自适应信道分配问题进行了形式化描述, 并分别分析了合作用户和非合作用户情况下的系统性能. 对于前者, 作者将信道分配问题形式化描述为潜博弈; 对于后者, 论文利用无悔学习算法寻找均衡点. 结果证实, 基于合作的动态频谱接入可提高网络整体性能, 但需要更高信息交换代价. 基于合作的方法强调系统的整体有效性, 必要时会牺牲局部性能换取整体性能. 作者通过实验证明合作与分配策略至关重要, 其中潜博弈算法受限于合作环境, 且对邻接节点的信息过度依赖, 因此应用受限; 相反, 无悔学习算法适用于非合作场景, 且需要的信息甚少, 因此适用性更广.

无政府状态的价格(Price of Anarchy, PoA)是最差情况下的 Nash 均衡结果与最优结果的比值. PoA 是分析非合作博弈的最优性的重要衡量标准. Halldorson<sup>[43]</sup>利用 PoA 分析了多买家和多卖家的动态频谱共享博弈. 研究结果表明, 在不考虑干扰限制的情况下, 动态频谱共享博弈下的 PoA 没有界定.

3.4.3 小结

基于图论的分配方法在网络拓扑结构的改变时将重新运行分配, 分配的完成时间与认知用户数量和空闲信道数及网络的动态性密切相关, 难以适应认知无线电中空闲频谱快速时变的要求; 基于频谱交易的分配方法利用微观经济学的理论实现分配, 可使频谱拥有者获得更多的利益. 但是基于频谱交易的方法适合于主用户、次用户间为租用关系的认知无线电系统, 应用范围具有局限性; 博弈论分配模型(表 3 是小结)更适应动态变化的通信环境, 方法更具灵活性和扩展性, 利用博弈论分析频谱用户之间的竞争与合作关系将在很

长一段时间内占主导地位。

表 3 基于博弈论的频谱分配算法小结

文献	行为	场景	博弈模型	方法
Cao 等[12]	合作	分布式	议价博弈	Nash Bargaining Solution
Etkin 等[40]	合作/ 非合作	集中/ 分布式	重复博弈	Folk 定理
Nie 等[41]	非合作	分布式	潜博弈	无悔学习
Halldorsen 等[43]	非合作	分布式	非合作博弈	Price of Anarchy

3.5 其他分配方法

正如前文所述,频谱分配并不是一个独立的过程,实际上与频谱检测、频谱接入技术密切相关.近年来,也有一些工作通过将频谱分配与频谱检测、频谱接入结合起来,建立动态频谱分配机制。

Yuan 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于时间频谱块的信道分配方案.该方案根据拓扑关系,基于带宽可变对感知到的信道进行动态规划.理论和实验结果都证明该算法的性能明显优于固定信道带宽分配算法。

Zhao 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于部分可观测的马尔可夫模型来模拟频谱的动态接入过程,并建立了一种离散信道接入协议.该协议将当前信道周期感知结果与前一周期状态进行比较,得到最优期望接入方案.然而,为避免和主用户发生冲突,通常采用周期性感知方法,这将导致吞吐量降低.文献[48]以系统吞吐量为最大化目标,基于一个合理的马尔可夫业务模型,提出了用户间高效的合作方案.文章得出了用户间有效的合作可以提高各自以及整个系统的吞吐量。

文献[19]中的协议要求每个节点具备多个感知电台,对所有频谱进行感知,并且要求预先知道信道状态之间的转移概率.这在实际网络环境中成本和代价太大,难以实现.因此,Hu 等<sup>[20]</sup>提出一种分布式的频谱感知与接入策略,利用最小团划分对网络节点之间的竞争关系进行有效的建模,并通过团内及团间的最优匹配算法对感知任务进行最优划分,从而提高整个网络的频谱利用率。

4 总结

作为提高频谱使用效率的一项关键技术,基于动态频谱接入的频谱共享技术研究将随着无线业务的发展而倍受关注,动态频谱分配技术研究的进一步工作包含以下几个方面:

**用户的异构性** 实际中主用户对频谱的占用和次用户对频谱的需求是随时间、地点变化而不断变化的.因此,为有效共享频谱,频谱分配设计应结合频谱检测与频谱决策.频谱检测实时捕捉环境的变化,分配算法则根据变化做出相应调整,使得更好地适应用户通信

环境的改变,确保高效地实现频谱共享。

**算法定量分析** 目前大部分关于频谱分配的算法设计都是基于定性分析,未来需要更多针对算法的定量分析,并在实际通信环境中验证算法的优越性.同时可考虑借鉴人工智能和机器学习的方法,分析网络、用户行为,为算法设计提供有效的指导。

**算法跨层设计** 频谱分配算法是属于 MAC 层的技术,但是各协议层并不是完全独立的.因此,可以考虑将频谱分配算法的设计与物理层或网络层结合考虑.如与物理层的频谱检测和网络层路由选择相结合,使得整体网络设计趋于更优,达到高效共享频谱的目标。

参考文献

[1] M Mchenry. Spectrum white space measurements[R]. New America Foundation Broadband Forum, 2003. 1 – 13.

[2] FCC. Spectrum policy task force report[R]. ET Docket No. 02 – 155, 2002.

[3] I F Akyildiz, W Y Lee, M C Vuran, S Mohanty. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127 – 2159.

[4] I F Akyildiz, W Y Lee, K R Chowdhury. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 810 – 836.

[5] R J Berger. Open spectrum: A path to ubiquitous connectivity[J]. ACM Queue, 2003, 1(3): 60 – 68.

[6] J Mitola III. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[A]. International Workshop on Mobile Multimedia Communications[C]. San Diego: IEEE, 1999. 3 – 10.

[7] FCC. Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies[R]. FCC-030322.

[8] T Yucek, H Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116 – 130.

[9] K Jain, J Padhye, V N Padmanabhan, L Qiu. Impact of interference on multi-hop wireless network performance[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. San Diego: ACM, 2003. 66 – 80.

[10] V Brik, E Rozner, S Banarjee, P Bahl. DSAP: A protocol for coordinated spectrum access[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore: IEEE, 2005. 611 – 614.

[11] H Zheng, L Cao. Device-centric spectrum management[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore: IEEE, 2005. 56 – 65.

[12] L Cao, H Zheng. Distributed spectrum allocation via local bargaining[A]. Sensor and Ad Hoc Communications and Net-

- works[C]. Santa Clara: IEEE, 2005. 475 – 486.
- [13] J Huang, R A Berry, M L Honig. Spectrum sharing with distributed interference compensation[A]. *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* [C]. Baltimore: IEEE, 2005. 88 – 93.
  - [14] S Ramanathan. A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks[J]. *Wireless Networks*, 1999, 5(2): 81 – 94.
  - [15] C Peng, H Zheng, and B Y Zhao. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. *Mobile and Networking Technologies for Social Applications*, 2006, 11(4): 555 – 576.
  - [16] 郝丹丹, 邹仕洪, 程时端. 开放式频谱系统中启发式动态频谱分配算法[J]. *软件学报*, 2008, 19(3): 479 – 491.  
D D Hao, S H Zou, S D Cheng. Heuristic algorithms for dynamic spectrum assignment in open spectrum system[J]. *Journal of Software*, 2008, 19(3): 479 – 491. (in Chinese)
  - [17] 廖楚林, 陈劫, 唐友喜, 李少谦. 认知无线电中的并行频谱分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(7): 1608 – 1611.  
C H Liao, J Chen, Y S Tang, S Q Li. Parallel algorithm of spectrum allocation in cognitive radio[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1608 – 1611. (in Chinese)
  - [18] Y Yuan, P Bahl, R Chandra, T Moscibroda, Y Wu. Allocating dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks [A]. *Mobile Ad Hoc Networking and Computing* [C]. Montreal: ACM, 2007. 130 – 139.
  - [19] Q Zhao, L Tong, A Swami, Y Chen. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework[J]. *Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3): 589 – 600.
  - [20] 胡罡, 徐明, 刘丽霞, 李宏建, 彭宇行. 无线认知网络中一种团划分的频谱感知算法[J]. *软件学报*, 2011, 22(2): 298 – 312.  
G Hu, M Xu, L X Liu, H J Li, Y X Peng. Spectrum sensing algorithms based on clique partition for wireless cognitive networks[J]. *Journal of Software*, 2011, 22(2): 298 – 312. (in Chinese)
  - [21] O Ileri, D Samardzija, T Sizer, N B Mandayam. Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server[A]. *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* [C]. Baltimore: IEEE, 2005. 194 – 202.
  - [22] 罗丽平, 邱焕新, 张广驰, 秦家银. 具有约束条件的认知无线网络最优频谱价格函数[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 562 – 566.  
L P Luo, H X Qiu, G C Zhang, J Y Qin. Optimal pricing function with spectrum constraint in cognitive radio networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 562 – 566. (in Chinese)
  - [23] L Badia, M Lindstrom, J Zander, M Zorzi. Demand and pricing effects on the radio resource allocation of multimedia communication systems[A]. *Global Telecommunications Conference* [C]. San Francisco: IEEE, 2003. 4116 – 4121.
  - [24] D Niyato, E Hossain. Hierarchical spectrum sharing in cognitive radio in cognitive radio: A microeconomic approach[A]. *Wireless Communications and Networking Conference* [C]. Hong Kong: IEEE, 2007. 3822 – 3826.
  - [25] S Gandhi, C Buragohain, L Cao, H Zheng, S Suri. A general framework for wireless spectrum auctions[R]. UCSB Technical. Report, 2007.
  - [26] M Babaioff, N Nisan. Concurrent auctions across the supply chain[A]. *Conference on Economic Commerce* [C]. New York: ACM, 2001. 1 – 10.
  - [27] R P McAfee. A dominant strategy double auction[J]. *Journal of Economic Theory*, 1992, 56(2): 434 – 450.
  - [28] X Zhou, S Gandhi, S Suri, H Zheng. eBay in the sky: Strategy-proof wireless spectrum auctions[A]. *Conference on Mobile Computing and Networking* [C]. San Francisco: ACM, 2008. 2 – 13.
  - [29] X Zhou, H Zheng. TRUST: A general framework for truthful double spectrum auctions[A]. *Conference on Computer Communications* [C]. Janeiro: IEEE, 2009. 999 – 1007.
  - [30] K Ryan, E Aravantinos, M Buddhikot. A new pricing model for next generation spectrum access[A]. *Proceedings of the First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum* [C]. New York, USA: ACM, 2006. 1 – 8.
  - [31] J Huang, R Berry, M Honig. Auction mechanisms for distributed spectrum sharing[A]. *Proceedings of the 42nd Allerton Conference* [C]. USA, 2004. 1 – 10.
  - [32] J Jia, Q Zhang, Qin Zhang, M Liu. Revenue generation for truthful spectrum auction in dynamic spectrum access[A]. *Mobile Ad Hoc Networking and Computing* [C]. New Orleans: ACM, 2009. 3 – 12.
  - [33] Q Wang, B Ye, T Xu, S Lu. An approximate truthfulness motivated spectrum auction for dynamic spectrum access[A]. *Wireless Communications and Networking Conference* [C]. Cancun: IEEE, 2011. 257 – 262.
  - [34] W Vickery. Counterspeculation, auctions and competitive sealed tenders[J]. *Journal of Finance*, 1961, 16(1): 8 – 37.
  - [35] A Mu'alem, N Nisan. Truthful approximation mechanisms for restricted combinatorial auctions; extended abstract[A]. *Conference on Artificial Intelligence* [C]. Palo Alto: Spring, 2002. 379 – 384.
  - [36] V Krishna. *Auction Theory* [B]. Academic Press, 2002.
  - [37] S D Vries, R V Vohra. *Combinatorial auctions; A survey* [J]. *Journal on computing*, 2003, 15(3): 284 – 309.

- [38] J Neel, J H Reed, R P Gilles. The role of game theory in the analysis of software radio networks[R]. SDR Forum Technical Conference, 2002.
- [39] J Neel, J H Reed, R P Gilles. Convergence of cognitive radio networks[A]. Wireless Communications and Networking Conference[C]. Atlanta: IEEE, 2004. 2250 – 2255.
- [40] R Etkin, A Parekh, D Tse. Spectrum sharing for unlicensed bands[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore: IEEE, 2005. 517 – 528.
- [41] N Nie, C Comaniciu. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore: IEEE, 2005. 269 – 278.
- [42] G Owen. Game Theory[B]. Academic Press, 1995.
- [43] M H Halldorson, et al. On spectrum sharing games[A]. Symposium on Principles of Distributed Computing[C]. Calgary: ACM, 2004. 107 – 114.
- [44] D Chen, S Yin, Q Zhang, M Liu, S Li. Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study[A]. Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Beijing: ACM, 2009. 13 – 24.
- [45] M McHenry, E Livsics, T Nguyen, N Majumdar. XG dynamic spectrum sharing field test results[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Dublin: IEEE, 2007. 676 – 684.
- [46] H Zheng, C Peng. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[A]. Conference on Communications[C]. Seoul: IEEE, 2005. 3132 – 3136.

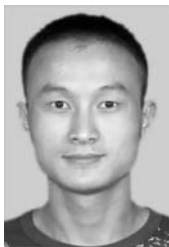
- [47] 荣玫, 朱世华, 李锋. 认知无线网络基于 F 范数的频谱共享[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 95 – 100.

M Rong, S H Zhu, F Li. Spectrum sharing based on Frobenius norm in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 95 – 100. (in Chinese)

- [48] 马志●, 曹志刚. 认知无线网络用户合作机会接入方案的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 678 – 683.

Z Y Ma, Z G Cao. Secondary user cooperative opportunistic access scheme in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 678 – 683. (in Chinese)

## 作者简介



王钦辉 男, 1985 年 8 月出生, 江西丰城人. 2007 年毕业于南京大学计算机科学与技术系, 其后在南京陆军指挥学院从事教学工作, 现为南京大学计算机科学与技术系硕博连读生, 从事认知无线网络及相关技术的研究.

E-mail: qhwang@dislab.nju.edu.cn



叶保留(通信作者) 男, 1976 年 4 月出生于江苏如东. 2004 年获得南京大学博士学位, 现为南京大学计算机科学与技术系副教授, 主要研究方向包括无线网络、普适计算、分布式计算与并行处理.

E-mail: yebli@nju.edu.cn