

Ad Hoc 认知无线网络中基于博弈论的公共信道建立算法

韩小博^{1,2}, 罗 涛¹

(1.北京邮电大学信息与通信工程学院,北京 100876;2.中国电信系统集成有限责任公司,北京 100035)

摘 要: 结合博弈论,论文首先提出一种基于博弈论的适用于认知 Ad Hoc 网络的公共信道建立算法,但该算法并不保证认知用户总是能够收敛到同一公共信道.随后,论文提出两种可收敛的改进算法.仿真结果表明改进算法能够适应不同的网络环境,使用户通过博弈过程最终收敛到同一个空闲信道上,完成公共信道的建立,并能在一定程度上保证信道质量.最后,论文对算法的收敛性进行了论证.

关键词: 博弈论; 动态; Ad Hoc 认知无线网络; 认知无线电

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1699-06

Common Channel Establishing Algorithms Based on Game Theory in Ad Hoc Cognitive Radio Networks

HAN Xiao-bo^{1,2}, LUO Tao¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876;
2. China Telecom System Integration, Beijing 100035)

Abstract: A Common Channel Establishing Algorithm Based on Game Theory in Ad Hoc Cognitive Radio Network (CRN) is proposed in this paper. However, this algorithm cannot guarantee that the cognitive radios converge to the same common channel. Then two improved algorithms which can guarantee convergence are proposed. The simulation results demonstrate that two improved algorithms can adapt to different scenarios and establish the common channel among Cognitive Users successfully through the gaming process. The channel quality can be ensured as well. In the end, this paper gives the argumentation on the algorithms' convergence.

Key words: game theory; dynamic; Ad Hoc CRN; cognitive radio

1 引言

随着通信技术的快速发展,无线频谱资源受限且使用效率不高^[1],为了缓解这一问题,认知无线电(CR: Cognitive Radio)技术应运而生. CR的典型特点就是适应频谱变化的多样性和随机性,为了检测信道和建立通信链接,认知用户(CU: Cognitive User)之间需要一条相对稳定的公共信道共享这些信息.此外,在一个认知网络(CRN: CR Network)内要进行相应的功率控制和信道分配算法,也需要公共信道来完成算法参数和相关信息的传输.因此,公共信道是 CRN的重要组成部分.但当前对 CRN中公共信道建立方面的研究相对较少.文献[2]研究了在 Ad Hoc 模式 CRN 中的一种基于分组和组间配合的公共信道建立算法.这种算法根据相邻的邻居节点的可用信道列表建立公共信道,而不同分组之间则通过边缘节点作为网关进行跨组通信,适用于分簇 Ad Hoc

网络.文献[3]则通过对于在同一路由上共享信道的用户进行分段来进行信道分配,并证明这种算法优于基于连接的信道分配算法.该算法考虑了授权用户(PU: Primary User)突然介入的情况,但并没有对公共信道的建立进行深入的分析.

博弈论作为一种对策论,常被用来分析经济活动中参与者的策略和相应的收益情况.博弈论的优势在于能够从普通参与者的角度出发,通过博弈策略分析,使得所有参与者能够达到某个稳定状态,即纳什均衡(NE),同时只要效用函数设计合理并且博弈过程也满足一定的条件约束,就能使得该均衡状态满足人们的需要.认知 Ad Hoc 网络因为其分布式的特点,其中的 CU 在网络中是对等的,并且有相同的通信策略,因而可以将 CU 抽象为博弈参与者.博弈论具有从一般个体入手,通过博弈过程达到全局目标的特性,因而在 CRN 中应用博弈论能够充分发挥其优势.另外,由于 CU 作为通信终

端,会严格按照制定的程式工作,并不具有自然人所有的自私特性,因而杜绝了在经济博弈论中由于某些参与者改变策略而引起的“颤抖手”现象,简化了博弈论处理的复杂性和不确定性.目前已有很多专家学者对博弈论在分布式网络中的应用进行了研究,并取得了一定成果^[4~6].文献[4]分析了博弈论在认知无线电频谱共享中的应用,分析结果表明博弈算法可以有效的减小网络中 CU 之间的干扰,提高接收信干比.文献[5]给出了博弈论应用于分布式功控的分析,分析结果表明在网络场景满足一定的条件下,使用某些特殊的博弈模型可以最大化网络容量.文献[6]则研究总结了各种博弈模型和均衡在认知无线电系统中的应用.目前尚未见到基于博弈论的公共信道建立算法的研究.

2 本文工作

考虑到 CRN 中公共信道的重要性和博弈论解决分布式网络问题的优势,本文提出了一种基于博弈论的公共信道建立算法(CCEG: Common Channel Establishment based on Game Theory)及其两种改进算法.本文提出的算法适用于 Ad Hoc 模式的 CRN,CRN 内的所有使用该算法的 CU 都能够在没有中心协调器的情况下通过博弈过程完成公共信道的建立,并能在一定程度上保证信道质量.

3 认知网络场景

本文主要研究由 N 个 CU 组成的一跳 Ad Hoc 模式 CRN 场景,如图 1 所示.为了便于描述和频谱检测,假设 CU 收发机为全频段全双工模式,且网络内的 CU 可以直接通信.经频谱检测后,每个 CU 都存有一张可用信道列表(ACL: Available Channel List),其中列出的编号是当前可供 CU 使用的空闲信道,其他信道被 PU 所占用.ACL 列表中的方括号内的编号为当前质量最优的信道.由于无线环境的差异,对于各个 CU 其 ACL 中的最

优信道不一定相同.

为了便于分析,结合实际 CR 系统的特点,可进一步假设:

(1)认知用户拥有全网定时的某种机制,以便进行同步信道列表更新和无线环境检测.

(2)物理层能够准确检测到 PU 的介入.

(3)所有信道状态在公共信道建立期间基本不变,使得算法能够有效收敛.

4 基于博弈的 CCEG 算法

4.1 场景参数描述

为了便于分析,这里假设所有 CU 组成一个 Ad Hoc CRN,网络周围可能有若干个 PU.共有 M 个信道,其中 PU 占据 m 个授权信道.各 CU 可以检测到这些已占用信道,而后形成自己的可用信道列表 $CH_{CU} = \{Ch_1, Ch_2, \dots, Ch_l\}$, $l = M - m$.

本文使用信道容量来衡量信道质量.接收信干噪比和其对应的信道容量分别为:

$$SINR_i = \frac{P_{com} \cdot g}{K_i + I_{-i}} \quad (1)$$

$$C_i = B \cdot \log_2(1 + SINR_i) \quad (2)$$

其中, P_{com} 为所有 CU 建立公共信道时的发射功率, I_{-i} 为其他用户对用户 i 造成的干扰.

4.2 CCEG 算法分析

根据博弈论,设计 CCEG 算法的具体步骤如下.

(1)网络初始化. CRN 中的各 CU 经频谱检测确定 ACL,并从中选择出质量最优的信道进行信息广播,广播信息包括该最优信道的信道容量 C_i ;

(2)在一个广播周期内, CU 对来自 ACL 中的所有信道上的信号进行接收,并进行统计;

(3)广播结束后, CU 根据效用函数计算 ACL 中每一信道的效用值,并选取使得效用函数值最大的信道作为下一次的广播信道,选取该信道的信道质量作为下一次广播信息内容;

(4)在算法规定数量的博弈周期过后,如果所有 CU 只在同一信道上接收到广播信息,则认为公共信道收敛于该信道, CCEG 算法结束. 否则转到步骤(2).

在每一次博弈周期中, CU 的接收信道在 ACL 中周期性地跳转,以接收来自其他 CU 在不同信道上的广播信息.统计意义上,一个周期内每个 CU 都在各个信道上收到一定数量的广播包,某信道上广播包数量的多少代表了选择该信道的 CU 数量的多少.对于一个 CU 用户来说,其他 CU 发送的广播信息中对同一信道的质量测量可能并不一样(由于衰落,多径等因素),所以在根据广播信息进行信道选取的时候,有必要对这些信息进行加权处理.这就需要设计一个合理有效的效用

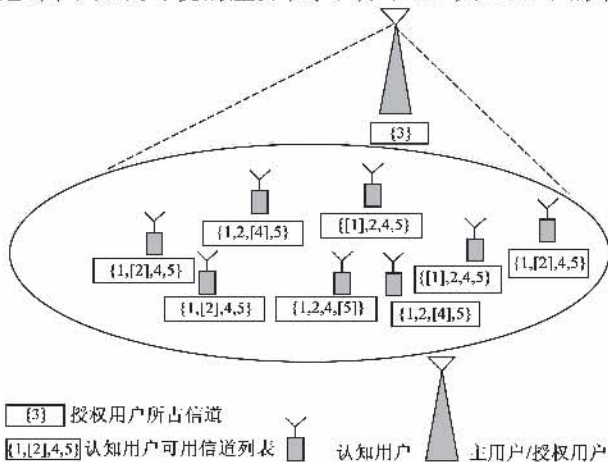


图1 Ad Hoc模式CRN场景模型

函数来完成这一工作。

4.3 效用函数设计

效用函数设计的基本思想是对和自身选择相同信道的接收广播信息进行贡献加权,认为其增加了效用函数的量值;而对和自身选择不同信道的接收广播信息进行惩罚加权,认为其减少了效用函数的量值。本文构造第 i 个认知用户的效用函数为:

$$U_i = C_{i, opt} \delta \frac{Nrx_i}{Nrx} + \sum_{t \neq i} \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{t,p} C_{t,p} - \sum_{t \neq i} \sum_{q=1}^l Q(q) Nrx_{t,q} C_{t,q} \quad (3)$$

式(3)中的参数定义如下:

N : 认知用户数量; l : 可用信道数量; i, t : 认知用户编号, 范围从 1 到 N ; p, q : 信道编号, 范围从 1 到 l . opt : 用户 i 所选择的最优信道编号, 范围从 1 到 l , 该 opt 值在一博弈周期内保持不变. U_i : 用户 i 选择信道 opt 作为公共信道的效用. $C_{i, opt}$: 用户 i 检测到的信道 opt 的信道质量, 并将其包含在广播信息中. $C_{t,p}$: 用户 t 检测到的信道 p 的信道质量, 并将其包含在广播信息中. $Nrx_{t,p}$: 用户 i 接收到的用户 t 在信道 p 上广播信息的次数. δ : 为用户自私因子, 代表用户 i 对自己最优信道的坚持度. Nrx_i : 用户 i 在信道 opt 上发送广播信息的次数. Nrx : 用户 i 接收到的所有广播信息的次数.

$$P(p) = \begin{cases} 0 & , p \neq opt \\ 1 & , p = opt \end{cases} \quad Q(q) = \begin{cases} 1 & , q \neq opt \\ 0 & , q = opt \end{cases} \quad (4)$$

函数 P, Q 是信道选择函数, 用于确定接收到的广播信息对总效用是增加还是减少. 如果广播信息中包含的信道是 opt , 则该信息会增加总效用 U_i ; 反之就会减少总效用 U_i . 从效用函数可知博弈过程并不是自私的, 每个用户在考虑自身信道选择对其他用户影响的同时也考虑了其他用户的信道选择对自身的影响.

下面将 CRN 抽象为博弈模型. 由于 CU 在整个公共信道建立期间, 其功能地位相同, 使用同一算法, 因而可以将 CU 抽象为博弈参与者. 考虑 CU 通过接收其他用户的广播信息, 从自身的效用函数出发进而选择策略, 即不同的公共信道, 因而可以将 ACL 抽象为策略集合. 整个场景抽象为博弈模型 $G = \{S_1, \dots, S_p, \dots, S_N; U_1, \dots, U_p, \dots, U_N\}$, 其中 G 代表整个博弈过程, S_p 代表第 p 个用户的策略; U_p 表示第 p 个用户的效用.

算法的设计目标是: 首先使得 CU 通过博弈能够收敛到某一信道, 保证公共信道的存在性; 其次尽量保证该信道质量, 以便确保 CU 之间公共信息和信令的可靠传输.

先分析博弈算法的收敛性, 对于一般的博弈过程, 判断其能否收敛到纳什均衡点比较困难. 一般的方法是看该博弈是否满足下述条件^[7]:

条件 1: 参与者集合是有限的.

条件 2: 行为集合是封闭的有界的凸集.

条件 3: 效用函数是行为空间上连续有界的, 拟凹函数.

如果满足以上条件, 则可以保证博弈过程收敛于纯策略纳什均衡, 即有唯一一纳什均衡点. 本算法的行为空间为 CU 选择公共信道的离散策略, 不满足上述条件 2. 但只要满足条件 1, 即有限的行动空间就可以保证博弈过程能够至少有混合策略纳什均衡, 并可以通过最佳反应收敛到该混合均衡, 即 CU 可能会在 ACL 中周期性地选择不同的信道, 使得算法无法正常收敛.

5 基于 CCEG 的两种改进算法及收敛性

5.1 两种改进算法

为了使得算法在混合策略的情况下也能收敛, 本文结合认知网络对算法进行了改进. 首先定义当前网络最优信道质量为:

$$U_{ch, max} = \max_{i \in \{1, \dots, l\}} \left(\sum_{t=1}^N N_{t,i} \cdot C_{t,i} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知, 网络最优信道质量是选择信道 i 的用户 t 的广播信息次数与用户 t 所测量的 i 信道的信道质量相乘并加权, 从中选取最大值. 式(5)从整个网络的角度反映了公共信道的优劣. 根据式(5)可提出下面两种调整方案:

调整方案 1 (CCEG-R1): 在一个博弈阶段过后如果全网仍没有收敛到同一信道, 则所有 CU 根据接收广播信息进行统计, 在当前可用信道列表选取当前网络最优信道质量的信道作为公共信道.

调整方案 2 (CCEG-R2): 加入最佳信道修正因子, 在每个博弈阶段过后如果全网没有收敛到同一信道, 则由式(5)定义的当前网络最优信道质量乘以一大于 1 的系数作为修正因子, 然后继续博弈过程. 可以证明经过有限次迭代后, 各个用户的效用函数形式不变, 总可以使全网收敛到同一信道.

5.2 算法收敛性

CCEG-R1 算法收敛性证明: 显然, 使用调整方案 1 公共信道总是可以成功建立的, 即使用 CCEG-R1 时, 总会收敛到一个公共信道上.

CCEG-R2 算法收敛性证明: 假设在不使用调整算法时, 上述效用函数不能使所有 CU 有效地收敛到公共信道上, 此时可以选取当前网络最优信道 p' 对其乘以系数 α 进行加权. 可令 C_{max} 为所有 CU 的 ACL 中所有信道质量的最大值, 而 Nrx 是每个 CU 在迭代周期中的固定广播次数, 显然, 对于效用函数(3)有:

$$\sum_{t \neq i} \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{t,p} C_{t,p} + \sum_{t \neq i} \sum_{q=1}^l Q(q) Nrx_{t,q} C_{t,q}$$

$$\leq (N-1)Nt_{\text{tx}}C_{\text{max}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)有

$$\begin{aligned} U_i &= C_{i, \text{opt}} \delta \frac{Nt_{\text{tx}_i}}{Nrx} + \sum_{z \neq i}^N \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{z,p} C_{z,p} \\ &\quad - \sum_{z \neq i}^N \sum_{q=1}^l Q(q) Nrx_{z,q} C_{z,q} \\ &\leq C_{\text{max}} \delta \frac{Nt_{\text{tx}_i}}{Nrx} + (N-1)Nt_{\text{tx}}C_{\text{max}} \\ &= U_{\text{max}}, \quad \forall i \in [1 \cdots N] \end{aligned} \quad (7)$$

对于式(3)由于 $\alpha > 1$, 使得对当前最优信道的信道质量 $C_{ch, \text{max}}$ 加入调整因子后, 对于任意 CU 选择非当前最优信道时有:

$$\begin{aligned} U_i &= C_{i, \text{opt}} \alpha \delta \frac{Nt_{\text{tx}_i}}{Nrx} + \sum_{z \neq i}^N \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{z,p} \alpha C_{z,p} \\ &\quad - \sum_{z \neq i}^N \sum_{q=1}^l Q(q) Nrx_{z,q} \alpha C_{z,q} \\ &\leq U_{\text{max}}, \quad \forall i \in [1 \cdots N]; C_{i, \text{opt}} \neq C_{ch, \text{max}} \end{aligned} \quad (8)$$

因此, 总存在 $\alpha > 1$ 使得任意 CU 选择最优信道时有:

$$\begin{aligned} U_i &= C_{i, \text{opt}} \alpha \delta \frac{Nt_{\text{tx}_i}}{Nrx} + \sum_{z \neq i}^N \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{z,p} \alpha C_{z,p} \\ &\quad - \sum_{z \neq i}^N \sum_{q=1}^l Q(q) Nrx_{z,q} \alpha C_{z,q} \\ &\geq C_{i, \text{opt}} \alpha \delta \frac{Nt_{\text{tx}_i}}{Nrx} + \sum_{z \neq i}^N \sum_{p=1}^l P(p) Nrx_{z,p} \alpha C_{z,p} - U_{\text{max}} \\ &\geq U_{\text{max}}, \quad \forall i \in [1 \cdots N] \end{aligned} \quad (9)$$

只需要:

$$\alpha \geq 2U_{\text{max}} \frac{Nrx}{Nt_{\text{tx}_i} C_{ch, \text{max}} \delta}, \quad \forall i \in [1 \cdots N] \quad (10)$$

即可. 由于调整算法在每次非收敛博弈过程结束后在上次调整的基础上乘以 α , 因此对于任意调整因子 $\alpha' > 1$, 经过有限次调整总能满足式(10). 调整方案 2 可以使得所有 CU 根据效用函数(3)建立唯一公共信道.

综上所述, 两种改进算法都可保证最终收敛到一个公共信道上, 可成功建立公共信道.

6 仿真结果

仿真使用图 1 给出的 Ad Hoc 模式 CRN, 仿真中每个 CU 在一个建立时间周期内发送的广播包个数为 200; 建立公共信道时的广播信息固定发送功率为 100mW; 高斯噪声功率范围为 0.01 ~ 10mW. 取调整间隔为 8, 即 8 个算法周期内仍无法收敛到公共信道则使用调整策略进行调整. 仿真中使用单径衰落信道, 但主要考虑大尺度衰落损耗.

6.1 三种算法的性能及收敛性

考察在不同信道数量和认知用户数量的情况下算法的性能. 图 2、图 3 分别给出了 4 用户 4 可用信道场景

下 ($N=4, l=4$) CCEG、CCEG-R1 和 CCEG-R2 算法的仿真结果. 由图 2 可见, 使用 CCEG 算法时, 从第 4 个博弈周期开始, 公共信道周期性地跳变, 对应于混合策略纳什均衡. 由图 3, 使用 CCEG-R1 和 CCEG-R2 调整方案, 在调整间隔后公共信道成功建立.

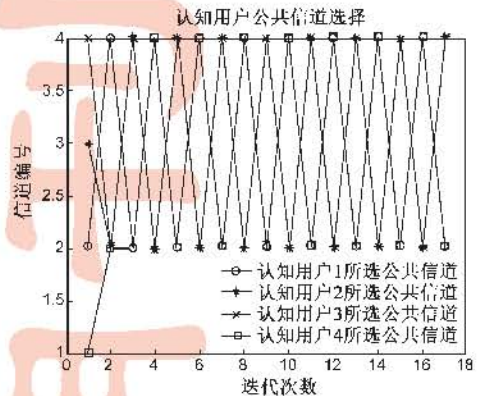


图2 CCEG算法仿真($N=4, l=4$)

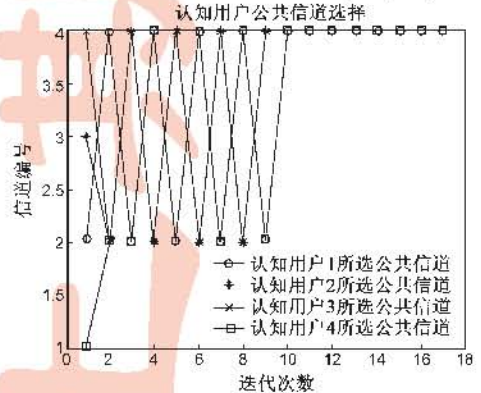


图3 CCEG-R1, CCEG-R2算法仿真($N=4, l=4$)

图 4 和图 5 分别给出 100 用户 10 个可用信道 ($N=100, l=10$) 及 100 用户 100 可用信道 ($N=100, l=100$) 场景下的两种调整算法仿真结果的比较. 由仿真结果可知, 两种调整算法能够适应不同的信道数量和用户数量的变化, 完成公共信道的建立, 具有一定的普适性.

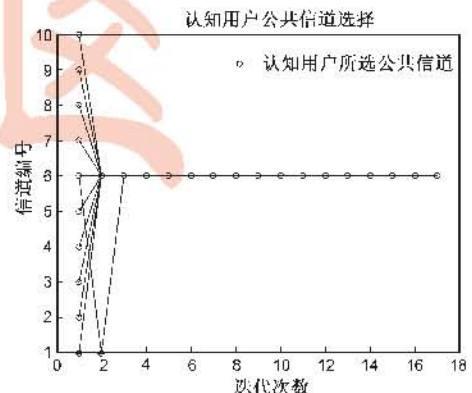
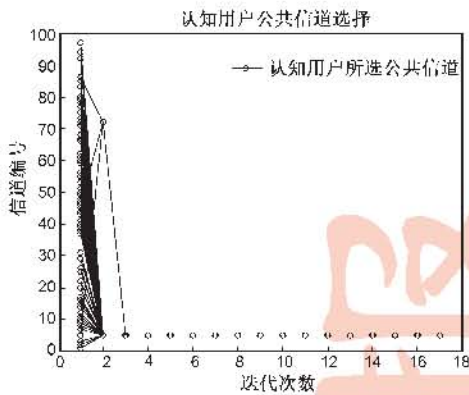


图4 算法仿真结果比较($N=100, l=10$)

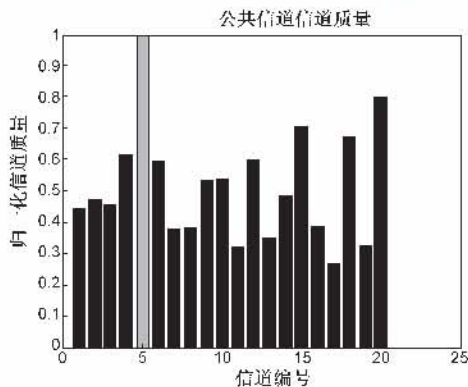
图5 算法仿真结果比较($N=100, I=100$)

6.2 讨论:公共信道质量的仿真分析

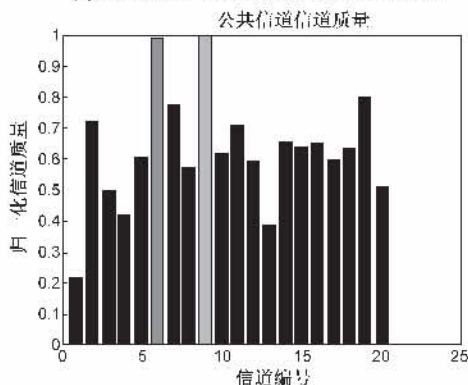
为了信息的可靠传输,算法应该保证公共信道的质量,本文用归一化信道质量求和来作为整个网络的信道质量,并以此衡量算法性能。定义网络归一化信道质量:

$$C_{i, norm} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{v, i}}{C_{max}}, \quad C_{max} = \arg \max_i \left(\sum_{i=1}^N C_{v, i} \right) \quad (11)$$

这里以8个CU和20个可用信道场景为例。分析两次随机场景中的仿真结果,随机场景1中CU将信道5作为公共信道,由图6(a)可知其归一化信道质量最优。由图6(b),CU在信道6上建立公共信道,其归一化信道



(a) 8位认知用户20个可用信道随机分布场景1



(b) 随机分布场景2下归一化信道质量

图6

并非是全局最优信道9,而是全局次优的。这说明博弈算法并不能保证每次都使得CU最终建立归一化信道质量最好的公共信道,这和具体的场景有关。博弈论本身也并不保证纳什均衡的全局最优性。通过对效用函数的分析可知,本文提出的效用函数综合考虑了整个CRN用户的策略,在一定程度上代表了网络的信道质量,由于博弈过程最终会选择使得效用函数最大的策略,因而算法会选择最优或比较优秀的信道(和具体场景有关)作为公共信道,最终的仿真结果也验证了这点。

7 小结

本文首先分析了认知无线网络中的公共信道的重要性 and 当前的研究现状。然后提出基于博弈的分布式CRN公共信道建立算法CCEG。该算法的基本思想是在一个Ad Hoc模式CRN环境下,通过用户间的分布式算法建立一个所有CU能够使用的公共信道,既照顾了不同认知用户间的局部信道状况,也更好地避免了对主用户的干扰,适应了CRN的实际频谱使用情况。全网可以从一般的初始状态逐渐建立起确定的公共信道,并在一定程度上保证信道的全网归一化信道质量,针对CCEG算法并不总是收敛的缺陷,提出两种改进算法CCEG-R1和CCEG-R2。最后,本文对几种算法的性能及收敛性进行了理论和仿真分析。

CCEG及其改进算法也有一定的缺陷,需要考虑的是由于在同一信道上多个用户同时随机广播信息可能碰撞导致信道拥塞,可能会降低完整收包率,特别是在用户数量比较多的环境中此算法性能可能下降,可以考虑增加广播周期长度或使用其他碰撞避免机制来改善性能。博弈论为通信领域特别是认知无线电领域提供了新的视角,在CR中基于博弈论的研究会越来越

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [A]. Mobile Multimedia Communications 1999 [C]. San Diego: IEEE International Workshop, 1999. 15 - 17, 3 - 10.
- [2] J Zhao, H Zheng, G. Yang. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks [A]. IEEE DySPAN 2005 [C]. Baltimore: First IEEE International Symposium, 2005. 259 - 268.
- [3] K. Bian, J. Park. Segment-based channel assignment in cognitive radio ad hoc networks [A]. Proc. CROWNCOM 2007 [C]. Orlando: International Conference, 2007. 327 - 335.
- [4] Q Zhao, Swami A. A survey of dynamic spectrum access: signal

processing and networking perspectives[A]. Proc. Acoustics, Speech and Signal Processing 2007[C]. Honolulu: IEEE International Conference, 2007. IV-1349-IV-1352.

- [5] C. Sung, Wong. A non cooperative power control game for multirate CDMA data networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2003, 2(1): 186 - 194.
- [6] J Neel, J Reed, R Gilles. Game models for cognitive radio algorithm analysis[A]. SDR Forum, 2004[C]. Phoenix: SDR Technical Conference, 2004. 15 - 18.
- [7] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海三联出版社, 1995. 1 - 364.
- [8] 韩小博, 罗涛等. 认知无线电中基于博弈论的公共信道的建立方法[P]. 中国发明专利申请号: 200910076265. 9.
- [9] 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.

Ma Zhi-yao, Cao Zhi-gang. 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:



韩小博 男, 1983 年生于河南新乡. 北京邮电大学通信与信息系统专业硕士. 研究方向为移动通信, 认知无线网络.

E-mail: xiaobohan@bupt. cn

罗涛 男, 1971 年生于陕西凤翔. 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士. 研究方向为宽带移动通信、车载移动通信、认知无线电等.