

认知无线电网络的MAC层关键技术

MAC Layer Key Technologies of Cognitive Radio Network

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: 1009-6868 (2009) 02-0020-05

摘要: 认知无线电作为一种智能的频谱共享技术, 已成为无线通信领域的研究热点。为达到在不干扰授权用户的条件下有效地实现机会式频谱利用, 认知无线电网络的媒体接入控制(MAC)层不仅需要提供传统的服务, 还要求能支持一套全新的功能。频谱检测管理通过对检测模式的选取、检测周期及检测时长的设置、检测信道的选取和检测静默期的设置等实现检测策略和参数的选取及优化。接入控制主要采用与授权用户协调接入和透明接入两种方式避免与授权用户的接入产生碰撞。动态频谱分配针对二进制干扰模型和累积干扰模型进行不确定频谱资源的优化分配。安全机制通过增加MAC帧的认证和保密以防御MAC层的安全攻击。跨层设计结合物理层和网络层、传输层等上层信息设计和实现全局优化的MAC层技术。

关键词: 认知无线网络; 频谱检测管理; 接入控制; 动态频谱分配; 安全机制; 跨层设计

Abstract: As a smart spectrum sharing technology, cognitive radio is becoming a hot topic in the field of wireless telecommunications. Besides providing traditional services, the cognitive radio network Media Access Control (MAC) layer is required to perform an entirely new set of functions for effective reusing spectrum opportunity, without causing any harmful interference to incumbents. Spectrum sensing management selects and optimizes sensing strategies and parameters by the selection of sensing mode, sensing period, sensing time, sensing channel, and sensing quiet period. Access control avoids collision with primary users mainly by cooperation access and transparent access. Dynamic spectrum allocation optimizes the allocation of uncertain spectrum for binary interference model and accumulative interference model. Security mechanism adds authentication and encryption mechanisms to MAC frame to defense MAC layer security attacks. Cross-layer design combines MAC layer information with physical layer or higher layers information, such as network layer, transmission layer, to achieve global optimization.

Key words: cognitive radio network; spectrum sensing administration; access control; dynamic spectrum allocation; security mechanism; cross-layer design

认知无线电(CR)技术通过对授权频谱进行“二次利用”的方式, 有效地缓解了频谱资源缺乏与日益增长的无线接入需求之间的矛盾, 越来越受到人们的关注。

为实现CR用户利用频谱空穴的

同时避免对授权用户造成有害干扰, 要求CR网络的媒体接入控制(MAC)层不仅提供传统的服务, 如媒体接入控制和健壮的数据传输, 还能支持一套全新的功能, 即在不干扰授权用户的条件下有效地实现机会式频谱利用。这些新的功能体现在MAC层的频谱检测管理、接入控制、动态频谱分配、安全机制及跨层设计等各个方

曾志民/ZENG Zhi-min

郭彩丽/GUO Cai-li

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

面, 下面将针对上述各技术分别进行探讨。

1 MAC层频谱检测管理

MAC层频谱检测管理主要用于控制物理层频谱检测算法的执行, 如决定检测哪些信道、何时检测等。目前MAC层频谱检测管理的研究主要关注检测策略和检测参数的选取及优化, 包括检测模式的选取、检测周期及检测时长的设置、检测信道的选取和检测静默期的设置等。

根据CR用户检测时机的不同, 检测模式可分为周期检测和按需检测。周期检测是指CR用户按一定的周期检测信道, 而不仅是有数据发送时才进行检测。这种方式可周期性地收集信道的状态信息, 利于估计信道状态, 快速定位频谱空穴。按需检测则是当CR用户有数据要发送时才去检测信道。相比周期检测, 按需检测减少了不必要的检测开销, 但检测到频谱空穴的时间较长。文献[1]依据“能量效率”原则, 通过对检测所消耗能量和寻找空闲信道所需延时进行折衷, 实现了检测模式的自适应选择。

在周期检测中, 选择合适的检测周期十分关键, 若检测周期过大, 则会因无法检测到某些空闲频谱, 而损失掉一些接入机会, 同时也会因未能及时检测到授权用户的出现而产生

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60772110)

20 中兴通讯技术

2009年4月 第15卷第2期 Apr. 2009 Vol.15 No.2

有害干扰;若检测周期过小,则会导致过于频繁的检测,消耗不必要的能量。周期检测通常包括同步周期检测和异步周期检测两种机制。同步周期检测机制为所有信道设置相同检测起始时间和相同检测周期,实现简单,缺乏灵活性;相对应的,异步周期检测机制灵活性受到了更多的关注。

文献[1]以最小化损失接入机会为优化目标,提出了一种自适应的异步检测周期优化算法。算法针对每个信道分别自适应设置其检测周期,对于减小定位空闲频谱时长,最大化利用接入机会起到了一定作用,但对每个信道来说,检测周期仍然是固定间隔的,即最优检测周期一旦选定就不再改变,本质上仍然是一种基于固定检测周期的检测机制。

作为固定周期检测机制的推广,文献[2]提出了一种基于可变检测周期(FSP)的检测机制,引入了“检测间隔控制因子”,通过调整该因子实现在信道状态可能发生变化的区域缩小检测周期,提高检测的效率,体现了周期变化的灵活性。为将FSP机制的可变检测周期进一步推广到随机检测周期,文献[3]又引入了每隔一段随机时间进行检测的随机检测机制(RAPSS),并提出了更具有一般性的检测周期优化模型(MRM-SPO),同时考虑了实际应用中由物理层检测算法局限性引起的检测错误存在情况,及为避免与授权用户频谱冲撞引入的CR用户延迟占用信道机制等对检测周期优化的影响。

检测时长作为周期检测的另一个主要参数,其设置的合适与否本质上是检测质量和检测速度折中的体现。缩短检测时长会导致检测质量下降;增大检测时长可提高检测质量,但同时会降低可用空闲频谱的利用率。检测时长除与底层硬件设备及物理层检测算法直接相关外,还可根据CR用户对空闲频谱的利用率^[4]、检测速度与检测性能折中^[5]等指标进行选取和优化。

为快速寻找频谱机会,除了对检测时长进行优化外,还涉及到检测信道的选取问题。现有关于选取检测信道的研究主要包括以下几个方面:选取最有可能空闲的信道进行检测^[6]、优化信道检测顺序等。

此外,检测静默期的设置也是MAC层频谱检测管理的重要研究内容。从CR网络的角度考虑,CR用户检测CR网络内某一频谱时,所有系统内其他工作于这个频谱的用户都应需要一段时间保持静默,以确保CR用户自身的通信不会干扰到对授权用户信号的检测,其中这段时间称为静默期。

静默期按照实现方式的不同可以分为两种:同步静默期和异步静默期^[7]。在同步静默期方式中,同一时间CR用户在系统所有可用信道上都停止发射信号,设置较为简单,每个CR用户都能够检测所有信道;异步静默期方式则是一个或多个CR用户在所占用的特定信道上停止发射信号,每个信道可以有不同的静默期,CR用户通常只能检测自身所占用的信道。由于同步静默期的实现需要动态宽带滤波器的支持,目前的研究多关注异步静默期,主要有利用保护间隔的异步静默期、时间不重叠的异步静默期^[8]等。

2 MAC层接入控制

MAC层接入控制的功能是确定CR用户是否可以接入网络及采用何种策略接入,是实现优化频谱分配的基本前提。由于授权用户接入信道具有绝对优先权,授权用户和CR用户是主从式动态接入信道的,这种关系体现于:当授权用户未占用信道时,CR用户机会接入空闲信道;当授权用户再次出现时,CR用户要及时退出正在使用的信道,避免和授权用户发生碰撞。通常将CR用户与授权用户的共享信道组成一个频谱共享池。根据授权用户接入频谱共享池时是否考虑CR用户的存在可以将CR用户

的接入控制分为与授权用户协调接入和透明接入两种类型。

2.1 与授权用户协调的接入控制

若授权用户的接入控制策略能够根据CR用户进行调整,则CR用户可以与授权用户协调接入频谱池。在这种接入方式下,授权用户考虑信道上是否存在CR用户,自动选取频谱池中的空闲信道接入。这样,如果频谱池中存在空闲信道,已接入的CR用户就可以继续占用信道,否则其业务就有可能被授权用户强制中断。由于授权用户接入信道时考虑了CR用户的存在,CR用户业务被强制中断的情况仅发生在频谱资源不足、授权呼叫请求发生阻塞时。通过CR用户与授权用户协调共享频谱,可使频谱资源的整体利用率得到提高。

仿真结果表明,相比于现有的授权用户独占信道的通信系统,CR用户采用与授权用户协调接入的方式,可以使信道利用率 η 最大增加40%,且阻塞率 $P_b < 10\%$,强制中断率 P_f 为0.1%左右^[9]。但CR用户与授权用户协调接入的方式要求授权用户网络做一些改动,如增加控制信道功能等,因此在实际网络中实现起来比较困难。

2.2 透明接入控制

考虑更接近实际的一种情况:授权用户接入频谱时不考虑CR用户是否存在,即CR用户是否占用频谱对授权用户来说完全透明。这种情况下CR用户应采用灵活的接入控制策略实现对授权用户的透明接入,尽可能减少授权用户的再次出现对CR用户业务的影响。若授权用户始终将其接入的频谱视为空闲频谱,而不考虑CR用户是否正在占用该频谱,那么相比于与授权用户协调接入方式,透明接入方式只要网络中存在CR用户,就有被授权用户强制中断的可能。在相同的仿真环境下,相比于与授权用户协调的接入控制,透明接入

的 η 和 P_b 性能相差无几,而 P_f 则增加了近一个数量级。较高的 P_f 对CR业务特别是实时通信业务的影响较大,如何降低 P_f 成为重点关注的问题。目前研究主要有信道预留和预测这两种方法。

(1) 基于信道预留的透明接入

基于信道预留的透明接入是有效降低CR用户 P_f 的策略之一,可为授权用户预留信道,也可为CR用户预留信道。

对于为授权用户预留信道方式,当授权用户接入时,先选择空闲的预留信道接入,若预留信道全部占用,则接入非预留的信道,即若为授权用户预留 R 个信道,则CR用户至多能够接入 $M-R$ 个。这种方式通过控制授权用户优先接入预留的空闲信道,减小了CR用户被中断的可能,但同时减小了CR用户的可用信道数,使 P_b 加大;对于为CR用户预留信道方式,当CR用户正在占用的信道再次出现授权用户时,CR用户切换到为其预留的信道上。这种方式下无需对授权用户进行控制,使授权用户网络不用作任何改变,但同样会增加 P_b 。

总之,基于信道预留的透明接入方式,其核心思想是预留一部分频谱资源给授权用户或CR用户专用,以达到降低 P_f 的目的,而实质是以一定的 P_b 性能的损失换取 P_f 性能提高。通常通过寻求最优的预留信道数取得 P_b 与 P_f 的折中。

(2) 基于预测的透明接入

采用预留信道的机制可一定程度上降低 P_f ,但由于实质上仍是CR用户与授权用户发生冲撞后被动地退出信道,这样无疑不仅会对授权用户造成有害干扰,还会引起CR用户频繁传输中断。若采用上述为CR用户预留信道方式用于切换还会不可避免带来一些切换时延。基于预测的透明接入方式则是通过预测信道的特性,如授权用户的信道占用规律、频谱空穴出现的位置及可能的空闲时长等,主动选择满足要求的最佳接

入机会,降低可能与授权用户冲撞的概率。预测的方法可以是基于历史信息的简单估计也可以是一些相对复杂的人工智能算法。

依据信道随授权用户占用和空闲动态变化的历史信息,文献[10]提出了一种启发式预测接入算法,从可用时间上估计信道的可用性;文献[11]提出了基于隐马尔可夫模型(HMM)的信道预测算法,通过预测授权用户的频谱空闲/占用的概率,得到频谱空穴出现的时隙及其空闲时长,CR用户基于频谱空穴的可能性来决定占用哪个信道。这样CR用户就可以根据信道预测信息及时地主动的退出下个时隙可能被授权用户占用的信道,而不是检测到授权用户后被迫强制中断,从而大大减少与授权用户冲撞的次数。

3 MAC层动态频谱分配

由于空闲频谱资源有限,CR用户之间需要竞争使用这些资源,且不同CR用户的优先级、QoS要求都不一样,所以CR网络需要在保证优先级高的CR用户先得到服务的同时也要保证频谱资源不会被某些CR用户独占,即网络需要公平而有效地管理空闲频谱资源。因此,空闲频谱分配的主要目的就是根据CR用户的优先级、QoS等要求,公平而有效地分配一定数量的频谱资源,使得网络性能得到改善或逼近于最优状态。

但受授权用户使用频谱的限制,CR可用频谱的数量和位置随时间在不断变化,因此对于这些“不确定”的频谱资源进行优化分配本质上是一个受限的频谱分配问题。这里还需注意的一点是:实时性要求是CR网络中频谱分配技术区别于其他无线通信频谱分配的最主要特点。这主要是由于授权用户是否使用频谱是一个随机过程,实际的可用频谱信息不断变化,相应的频谱分配算法执行时间应尽量缩短。提高实时性体现于降低算法复杂度、减小信令开销等多个

方面。

在频谱分配算法中,若简化考虑CR用户与授权用户之间以及CR用户之间的干扰结果为仅有两种情况,即不干扰或干扰,分别记为0或1,称为二进制干扰模型;若考虑实际中多个用户会同时对某一授权用户或CR用户造成干扰,称为累积干扰模型。这时要求每个CR终端能够测量得到不同频段的本地干扰温度。在二进制干扰模型中,当干扰结果为1时,CR用户不能分配该频段;在累积干扰模型中,当多个CR用户在某个频段的累积干扰温度超过了干扰温度限时,CR用户不能分配该频段。针对这两种干扰模型,分别有以下两类频谱分配算法:

(1) 基于二进制干扰模型的频谱分配

现有的基于二进制干扰模型的频谱分配算法大都是基于图着色理论,可根据CR用户之间是否合作分为合作频谱分配算法和非合作频谱分配算法。

合作频谱分配算法通过多个CR用户之间相互交换分配信息、协商频谱分配,具有很好的优化性能。文献[12]选取信道利用率最大和公平性最优为优化目标,分别提出了分布式贪婪算法(DGA)和分布式公平算法(DFA)。为降低算法的复杂度,同时提出了一种随机分布式算法(RDA),并指出复杂度较低的算法更适合于CR网络环境。由于DGA、DFA和RDA等算法完成的时间随着信道数的增多而增加,为缩短算法执行时间,文献[13]提出一种并行分配算法,把复合图分解为多个简单子图,更适用于大规模系统的频谱分配。上述算法都是基于固定网络拓扑的假设,对于网络拓扑可变的情况,文献[14]提出了一种Bargaining算法,通过将受拓扑变化影响的CR用户自组织成Bargaining群,仅对Bargaining群进行局部优化,相比于DGA算法通信开销降低了50%以上,但信道利用率性能稍差一些,且还存

在一定的群内合作通信开销。

上述基于合作的算法为了共享相邻用户频繁交换的协作信息,需要公共的协调协议和控制信道,必然会增加系统的复杂性和额外开销。这对于能量受限的通信系统,如Ad Hoc网络、无线传感器网络等并不适用。针对以上问题,Zheng等人提出了基于规则的算法^[15]。其基本思路是用户通过观察本地干扰码型,依据预先设定的适用于不同场景的规则独立决策选择信道,从而使系统的性能、复杂度和通信成本取得折中。实验结果表明相对于合作算法,这种基于规则的非合作算法可在提供相同通信性能的前提下将通信开销降低3~4倍。

(2) 基于累积干扰的频谱分配

现有的基于累积干扰模型的频谱分配算法大都基于博弈理论。按CR用户对频谱的占用方式不同可以分为两类,即共用式频谱分配算法和独占式频谱分配算法。

共用式频谱分配是指多个CR用户之间以干扰避免或时分复用的方式来分配频谱资源。由于多个CR用户共同占用同一段频谱,不可避免要产生同频干扰。如何减小同频干扰,最大化CR用户的收益是面临的主要问题。

针对不同的频谱共享应用场景,现有的研究分别提出了不同的模型和算法。若授权用户只有少量的频谱资源可提供给CR用户机会占用,多个CR用户为了获得有限的频谱资源会产生竞争,这种场景可以抽象为经济学中分析供不应求的寡头垄断市场的古诺博弈模型;若不需考虑CR用户对授权用户的干扰影响,只考虑CR用户之间的干扰,文献[16]提出基于势力场博弈模型的干扰效用函数。势力场博弈适用于效用函数中考虑用户间合作决策的情形,其收敛速度快,但当效用函数只考虑自身因素时势力场博弈将不再适用。

针对这种情形可以利用非遗憾学习算法来解决,仿真结果表明非遗

憾学习算法收敛于混合策略纳什均衡。文献[17]从避免CR之间竞争频谱产生冲撞的角度提出一种以最大化CR用户在所有信道上的总传输速率为目标的效用函数,多个CR用户通过在可用信道上调整传输概率来避免冲撞,从而提高总的传输速率。为得到相关均衡解,文献[17]同时提出了一种非遗憾学习算法来保证收敛,并证明了这种算法以概率1收敛于相关均衡。

仿真结果表明,应用相关均衡可以比应用纳什均衡得到5%~15%的频谱利用率提升。

独占式频谱分配中由于各个用户独占频谱,用户间无需考虑同频干扰,这时CR用户间的竞争单纯表现在频谱的争用上。设系统中存在多个出租频谱的授权用户和多个租赁频谱的CR用户,授权用户通过拍卖来出租未使用的频谱,CR用户则通过竞价来获得频谱,这种关系可应用博弈论中的双向拍卖理论进行建模。由于存在多个授权用户和多个CR用户,则不但CR之间存在竞争,授权用户之间也存在竞争。双向拍卖模型中,由于用户需要根据其他用户的报价来选择自己的报价,用户之间的信息交互频繁,而在实际的系统中由于频谱状态的时变性和用户的自私性,很难在双向拍卖中实现双边议价。为了解决上述问题,文献[18]对双向拍卖模型进行了改进,针对无中心控制、存在自私用户的场景,在双向拍卖模型的基础上提出了一种基于信任率的动态议价方案,通过博弈的历史信息建立预测其他用户策略的信任率,从而指导用户决策,在非完全信息的情况下达到高效议价目的。基于信任率的动态议价方案也可以利用双向拍卖模型中的扩散减小准则,进一步加快算法的收敛。

4 MAC层安全机制

由于CR技术的引入,CR网络除同样面临传统无线网络的很多安全

问题外,还面临一些新的安全隐患。如在MAC层,由于存在频谱检测的同步、缺乏公共控制信道等固有的问题,其安全问题也不可忽略。CR网络MAC层可实施的4种新的攻击手段分别为:

(1) 偏袒效用攻击:自私的CR用户可以通过修改MAC层频谱分配效用函数的参数来增加自己所获得的带宽,如果其他CR用户或者基站无法检测到这种异常行为,将会导致其他CR用户的可用频谱资源的减少。

(2) 异步感知攻击:在其他CR用户进行同步静默期检测的时候,恶意CR用户选择异步发送信号,从而使得基站或其他CR用户误以为检测到的是授权用户发送的信号,导致频谱机会的丢失。

(3) 虚假反馈攻击:恶意用户通过反馈虚假的频谱检测或分配信息来破坏频谱分配的公平性或引发其他节点的错误行为,这种攻击行为就是虚假反馈攻击,在集中式和分布式的CR网络中都可以实施。

在集中式的CR网络中,虚假反馈攻击通常发生在恶意节点通过向基站回报虚假的频谱感知信息的场景下,但由于基站是通过信息融合来进行判决,要实施这种攻击,需要大量的恶意节点汇报相同的虚假信息,其效率是比较低的。

在分布式的CR网络中,CR用户通过交互信息来进行协作信道分配,若一个或一组恶意用户对于授权用户频谱占用情况或可用信道情况传递虚假反馈信息,将会导致其他CR用户做出干扰授权用户或丢失频谱接入机会的决定。

(4) 饱和控制信道攻击:在CR网络中,公共控制信道既是网络性能的瓶颈,也是安全的关键点。公共控制信道之所以成为网络性能的瓶颈,是由于业务流量的增大会引起频繁的控制信息交互,从而可能造成控制信道饱和,另外控制信息数据包的碰撞会降低控制机制的有效性,同时影响

信道协商分配过程,这两种情况都会造成网络性能的下降。而成为安全的关键点,是因为攻击者可以通过发送大量伪造的MAC控制信息来造成饱和和控制信道攻击,这样合法的CR用户就无法利用控制信道来协商数据信道的分配了,从而造成CR网络不可用。

以上MAC层的攻击行为主要通过通过对MAC帧的修改和伪造来实施。对于集中式网络,可增加对MAC帧的认证机制。如IEEE 802.22 WRAN网络中,BS/CPE协议参考模型建立了4个专用的模块化安全子层,用来保护数据、认证频谱感知和定位信息、认证频谱管理实体的配置信息。

然而在分布式CR网络中,由于缺乏可信的实体作为服务器控制密钥分发来进行加密认证和完整性保护,应用安全子层非常困难。因此,采用相邻节点监视机制应该更适用于分布式CR网络。

5 MAC层的跨层设计

上述MAC层各关键技术的设计通常受限于传统的分层协议模型。为适应CR网络自适应动态无线环境的特性,如何结合物理层和上层信息,设计和实现全局优化的MAC层技术,成为目前的研究热点之一。

在MAC层与物理层跨层设计方面,文献[19]提出了基于检测贡献加权的比例公平性频谱分配算法,将MAC层的频谱分配和物理层的频谱检测联合设计,为在频谱检测中作贡献大的CR用户分配更多的频谱,最大化系统吞吐量的同时体现分配的公平性。

文献[20]提出了带宽功率控制博弈(BPCG)算法,将MAC层的频谱分配和物理层的功率控制联合设计,在降低用户之间干扰的同时,通过对频谱的有效分配,充分利用频谱资源,实现网络吞吐量的提高。

在MAC层与网络层路由选择跨层设计方面,研究表明,MAC层频谱

分配和网络层路由的联合设计能显著提高连接的稳定性和端到端的吞吐量^[21],其基本思想是将路由选择和频谱分配两项任务合并到网络层执行,由网络层选择路由并调度路由上无冲突信道的使用。基于这一思想,文献[22]提出一种合作式路由选择和频谱分配的跨层解决方案。MAC层和网络层的合作通过分级路由和信道选择过程实现,在选择路由的同时,调度每段路由上无冲突信道的使用,使得路由的稳定性和端到端吞吐量得到提高。

在MAC层与传输层跨层设计方面,MAC层的频谱分配和传输层TCP协议进行联合跨层设计,可避免频谱的动态变化对TCP协议超时重传机制带来的不利影响。

可能的解决方案是:TCP协议根据MAC层的频谱分配情况获取CR用户当前工作的频段,并计算出该频段对应的传输往返时间(RTT),结合RTT设置恢复时间目标(RTO)参数。同时,当MAC层的频谱分配发生改变时,TCP协议结合CR用户工作频段的变化情况重新计算出当前工作频段对应的RTT,从而根据变化的RTT自适应地调整RTO参数,使协议性能得到优化。

6 结束语

CR网络是目前的一个研究热点,而其中MAC层关键技术的研究则是人们关注的重点。当前MAC层频谱检测管理、接入控制、动态频谱分配、安全机制及跨层设计等问题还处于理论研究的阶段。相信通过研究人员的不懈努力,CR网络将进一步走向实用。

7 参考文献

- [1] KIM H, SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533-545.
- [2] 张宇,冯春燕,郭彩丽. 基于可变间隔的认知无线电频谱检测机制[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 128-131.

- [3] GUO CAILI, ZENG ZHIMIN, FENG CHUNYAN, et al. Random periodic spectrum sensing with period optimization for cognitive radio networks[C]// Proceedings of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS' 08), Nov 19-21, 2008, Guangzhou, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1504-1508.
- [4] WANG PENG, XIA LIMIN, ZHOU SHIDONG, et al. Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems [C]// Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'07), Mar 11-15, 2007, Kowloon, China. New York, NY, USA: IEEE, 2007: 1111-1115.
- [5] AMIR G, ELVINO S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in Cognitive Radio Networks [C]// Proceedings of 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC' 07), Jan 11-13, 2007, Las Vegas, NV, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1022-1026.
- [6] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3): 589-600.
- [7] 王锐,陈永州,区国琛,等. 一种感知无线区域网系统中确定异步寂静周期的方法: 中国, CN101026446 [P]. 2007-08-29.
- [8] KANG BUB JOO. Method for sensing spectrum and arranging quiet periods in cognitive radio system, customer premise equipment, base equipment, base station and superframe structure using the same: PCT, WO2007094604 [P]. 2007-08-23.
- [9] CAPAR F, MARTOYO I, WEISS T, et al. Comparison of bandwidth utilization for controlled and uncontrolled channel allocation in a spectrum pooling system[C]// Proceedings of 55th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring' 2002): Vol 3, May 6-9, 2002, Birmingham, UK. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1069-1073.
- [10] JONES S D, MERHEB N, WANG I J. An experiment for sensing-based opportunistic spectrum access in CSMA/CA Networks[C]// Proceedings of 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05), Nov 8-11, 2005, Baltimore, MD, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 593-596.
- [11] AKBAR I A, TRANTER W H. Dynamic spectrum allocation in cognitive radio using hidden Markov models: Poisson distributed case[C]// Proceedings of IEEE SoutheastCon, Mar 22-25, 2007, Richmond, VA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 196-201.
- [12] WANG WEI, LIU XIN. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks[C]// Proceedings of 62th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall' 2005): Vol 1, Sep 26-29, 2004, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 690-694.
- [13] 廖楚林,陈劫,唐友喜,等. 认知无线电中的并行频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007,

► 下转第29页