软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2012,23(7):1824−1837 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04225]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

认知无线网络信道接入协议*

阚保强[1+], 范建华[1], 王建业[2]

[1](南京电讯技术研究所,江苏 南京 210007)

[2](空军工程大学 导弹学院,陕西 西安 710051)

MAC Protocols for Cognitive Radio Networks

KAN Bao-Qiang[1+], FAN Jian-Hua[1], WANG Jian-Ye[2]

[1](Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China)

[2](College of Missile, University of Air Force Engineering, Xi'an 710051, China)

+ Corresponding author: E-mail: bqkan@163.com

Kan BQ, Fan JH, Wang JY. MAC protocols for cognitive radio networks. *Journal of Software*, 2012,23(7): 1824−1837 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4225.htm

Abstract: The cognitive radio network (CRN) has been paid more attentions as it can enable the device to dynamically access unused spectrum without interference to primary users (PUs). The medium access control (MAC) protocol of CRN, has being intensively researched for its key function position. This paper reviews the demand of MAC for CRN, the state-of-the-art spectrum sensing technology, and a detailed classification of the MAC protocols. In this overview, the characteristic features, advantages, and the limiting factors of the existing CRN MAC protocols are thoroughly investigated for both underlay-based and overlay-based networks. Several challenges and future research directions are also presented in this paper.

Key words: cognitive radio network; spectrum sensing; medium access; dynamic spectrum allocation; interference

摘 要: 由于认知无线网络(cognitive radio network,简称 CRN)固有"二次利用"的特性,使其日益得到重视.而作为 CRN 核心构成的 MAC(medium access control)协议,业已成为当前各研究机构的一个热点.主要对频谱感测技术、信道接入技术等 MAC 层核心设计问题进行了探讨,并针对认知无线网络 MAC 的特性及需求进行了分析,然后对设计 MAC 频谱感知技术、信道接入技术、频谱共享技术等相关研究进展进行了归类总结.最后指出了当前面临的主要研究难点及挑战,并提出了一些方向性建议.

关键词: 认知无线网络;频谱感知;信道接入;动态频谱分配;干扰

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

认知无线网络是建立在认知无线电平台的多网智能共存的可行架构,其与认知无线电(cognitive radio,简称 CR)的区别是对多域的认知.当然,理想化的 CR 与认知无线网络是等同的,因为它们都是对用户需求的全认知,包括节点能力、网络需求以及外部环境.软件无线电(software-defined radio)平台是 CR 的基础,它与认知无线电

* 基金项目: 中国博士后科学基金(201150M1512); 国防科技重点实验室基金(9140C020302110C0206)
收稿时间: 2011-09-21; 修改时间: 2012-01-17; 定稿时间: 2012-03-23

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

都是由 Mitola 博士分别在 1991 年和 1998 年提出来的.CR 包含对无线环境感知算法的认知引擎(cognitive engine,简称 CE)、机器学习和决策、可配置无线电平台等几个功能模块.认知无线网络是基于认知无线电平台的网络架构,所以它与 CR 有非常多的共性,只是其不仅仅是停留在对授权频谱的“二次利用”上,也包括对 ISM 波段的动态频谱接入.当前,认知无线网络的研究基本上还是偏重于架构的研究,但以 CR 为研究重点可以在应用实现上有较快突破[1−8].

认知无线网络的主要目的是其对频谱资源的“二次利用”,即在不给主用户服务质量带来影响情况下的频谱利用,同时保证自身服务质量需求,其典型的应用就是动态频谱接入(dynamic spectrum access,简称 DSA)[5].因此,认知无线网络有以下两个显著特点:

(1) 授权用户接入信道具有绝对优先权,即认知无线网络节点存在与生俱来的保护 PU 传输的义务.授权用户和 CRN 用户是主从式动态接入信道的,这种关系主要表现在如下两个方面:
其一,当授权用户未占用信道时,CRN 用户(secondary user,简称 SU)机会接入空闲信道;当授权用户再次出现时,CRN 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;
其二,当授权用户占用信道时,CRN 用户在不影响授权用户服务质量的情况下接入信道;

(2) 认知无线网络信道的时空变化性.传统的无线网络多是固定信道,即使是多信道传输也是预先定义;而认知无线网络由于是在不影响 PU 传输的条件下工作,所以其信道选取具有时空多变性,甚至存在传输未结束即切换频谱的现象.

MAC 协议的功能是确定 CRN 用户采取什么信道和何种策略接入,是实现认知无线网络频谱共享的基本前提.MAC 设计的目标是降低节点传输冲突比例,同时提高频谱资源利用率.其评价指标可归纳为以下几个方面:

(1) 网络吞吐量(network throughput):对于认知无线网络,提高网络吞吐量既要求低的包延迟,同时也要求低的冲突概率;

(2) 带宽利用率(bandwidth efficiency)或频谱利用率(spectrum utilization efficiency):认知无线网络的特点就是对频谱资源的“二次利用”,因此,带宽或频谱利用率是一个重要的指标;

(3) 服务质量(quality of service,简称 QoS)支持:针对不同的应用需求,如视频、语音通信,提供保证一定质量的服务.由于认知无线网络环境的时变性,要提供长期占用一定带宽要求的服务是具有挑战性的;

(4) 能量消耗:对于认知无线网络,节点大多是移动设备,能源受限;

(5) 信息共享高效性或额外负载比率(overhead ratio):如何设计一种高效的信息广播机制,将频谱感测使用信息、路由信息、同步等信息分享传递到邻居节点;

(6) 成本:认知无线网络的特点使得节点必须具备一定的认知、共享能力,这势必增加了节点的复杂性和成本.因此,如何设计高效的 MAC 协议,降低对认知节点的硬件要求、降低节点成本也是非常重要的.

与传统 MAC 协议不同,CRN MAC 更强调高准确度感测、统计规律学习和改进型策略实施.比如,传统 MAC 层的载波侦听机制无法判断出阈值的提升是由 SU 还是 PU 造成的,因此,当遇到传输失败时只能进行简单的重传操作.但是对于 CRN,如果是由于 PU 造成的传输失败,则需 SU 尽快释放占用信道或采取低干扰传输策略,以避免对 PU 传输的影响.因此,对于 CRN MAC,必须要有准确的感测功能模块支持.

1 信道接入控制基本架构

由于对 CRN 的上述特殊要求,使其 MAC 设计必须包含以下功能模块:

- 频谱感测及调度:其目的一是控制物理层频谱检测算法的执行,如分配节点检测哪些信道、如何调度检测周期等,完成对所在无线环境的频谱探测;二是获取授权用户频谱占用统计规律,以便为上层改进未来决策提供支持;
- 频谱管理:主要是基于不同频谱链路质量,利用可用频谱池进行优化选取与分配,同时根据频谱感测获取的频谱信息与节点间信道利用信息交互实时更新频谱池;
- 频谱接入控制:主要包括冲突避免策略、干扰抑制方法;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

- 跨层认知服务支持:认知无线网络的认知性要求使得跨层设计成为一种必然选择,因此,认知无线网络MAC 层需设计可获取或提供给其他层信息的功能模块.

频谱感测及调度是基础,频谱管理与频谱接入控制是核心,跨层认知服务支持是重要接口.

2 频谱感知技术研究进展

频谱感知技术是认知无线电中极其重要的环节,而对于频谱感知的研究,主要围绕着如何提高检测的灵敏度和准确性来开展的.因此,当前研究主要集中于两个方向:一是设计提高射频前端的灵敏性;二是通过研究具有更好性能的本地感知算法以及采用协同频谱感知.基于感测源的分类,频谱感知技术可以分为发射机检测、接收机检测和干扰检测,如图 1 所示.目前,接收机检测只在电视接收机信号泄露检测中有应用;干扰温度检测由于是一种非识别检测,所以应用范围也较小.这里,我们主要介绍目前比较重点研究的发射机信源检测技术[9,10].

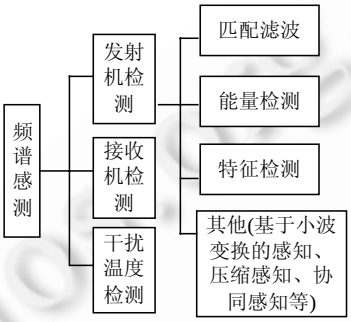


Fig.1 Classification of spectrum sensing technology

图 1 频谱感知技术分类

2.1 频谱感知基本技术

2.1.1 匹配滤波法(match filter,简称 MF)

匹配滤波法是一种比较常用于信号检测中的算法,也是理论上的最佳检测器.这种方法的主要特点是,可以在很短的时间内获得高处理增益.与其他的检测算法相比,检测同一个信号,在相同的虚警概率和检测概率条件下,它需要的采样数最少为

$$N=\frac{[Q^{-1}(P_f)-Q^{-1}(P_f)]^2}{SNR} \tag{1}$$

当使用匹配滤波进行检测时,需要授权用户信号为确知信号,这样,CRN 用户首先要知道授权用户的解调相关的信息(如调制方式、时序、脉冲形状等),利用这些信息来实现与待检测信号的同步,从而解调信号.由此可以看出,认知设备对于每一类授权用户信号的检测都需要一个专门的接收机,这就限制了这种检测方式的应用.尤其是在多用户网络认知环境中,同时存在多种类型信号的主用户,使用匹配滤波检测方法将不能实现检测.所以,匹配滤波法只能应用于对授权用户信息比较了解的频谱环境当中.当不能预先知晓主信号的信息时,则无法采用该检测方法.该算法的原理框图如图 2 所示.

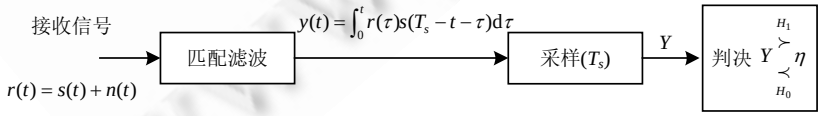


Fig.2 Match filter based detection diagram

图 2 匹配滤波法检测技术框图

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.1.2 能量检测法(energy detection,简称 ED)

能量检测方法是由 Urkowitz 提出来的,它根据接收信号的能量或功率大小来判断信号是否存在,在频谱感知中具有一定的实用价值,也是当前唯一在认知无线电平台应用实现的方案.能量检测法是一种信号的非相干检测方法,可以直接对时域信号采样求模,然后平方累积求和就可以得到(也可以利用 FFT 转换到频域,然后对频域信号求模平方也可以得到).能量检测法一般采用二元假设,即 H_0 表示授权用户没有信号,该频段空闲;H_1 表示授权用户正在占用该频段.其检测过程如图 3 所示,基于阈值 η,如果检测到 $Y\geqslant\eta$,那么可以认为假设 H_1 成立,即授权用户正在使用当前频段;反之,如果检测到 $Y<\eta$,那么假设 H_0 成立,当前频段空闲.

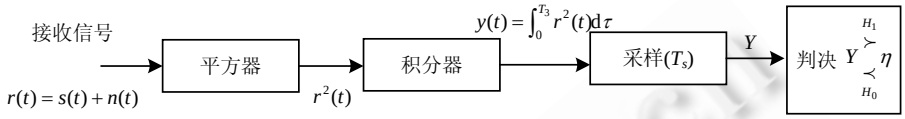


Fig.3 Energy detection diagram

图 3 能量检测法框图

能量检测的特点是实现简单,适用范围广.尤其对于先验信息未知的信号检查,它是最优的算法.但能量检测法也存在明显的缺点,它的检测门限依赖噪声功率的估计,而其受到未知噪声功率变化的影响较大.所以,当检测器采用固定门限判决时,将会受到实际噪声功率变化的影响,造成了检测性能的下降.另外,在信噪比(signal noise ratio,简称 SNR)很低时,信号基本淹没在噪声中,此时,能量检测法将无法检测到信号.另外,能量检测法还不具备区分信号类型的能力,无法识别干扰.

为了改进能量检测算法的不足,一些文献基于能量检测算法提出了双门限能量检测感知算法、多分辨率频谱感知算法以及基于小波包变换的频谱感知算法[11].

- 在双门限能量检测算法中,通过利用两个阈值来降低突发噪声或干扰造成的误判,这种方法虽然有效地减小了 SU 与 PU 的碰撞概率,但也减少了 SU 的接入信道机会,使频谱利用率无法得到进一步提升;
- 多分辨率频谱感知算法的核心是利用小波变换估计接收信号的功率谱,通过动态调整分辨率及对可变分辨率的分析,利用连续小波变换计算相应频段内的能量,从而判决 PU 的存在性.由于是采用连续小波变换实现功率谱估计,所以该方法在低频段分辨率较高,但在高频段分辨率较低.为了解决这一问题,一般可通过减小小波基函数冲击时长的方法来提高高频段分辨率;
- 基于小波包变换的频谱感知算法是为了解决多分辨率频谱感知中高频段分辨率低的问题,通过将频段进行分块,尤其是对高频段细分多块,使得待测频段具有相同的分辨率.其工作原理是,利用小波包变换对接收信号进行多次正交分解,不断提高正交分解率,直到每个频段都得到期望的分辨率;然后将具有相同频率的小波包变换系数求平方和得出接收信号的功率谱,并最终得到感知频段的能量来判决 PU 的存在性.

2.1.3 循环特征检测(cyclostationary detection,简称 CD)

循环特征检测法是基于人为设计的系统中信号统计特性具有一定的周期性这一事实而提出来的,这类信号被称为循环平稳信号(cyclostationary signals)[12].循环特征检测法的结构如图 4 所示.循环特征检测的优点是其对未知噪声变量的鲁棒性,所以更利于区分噪声.但是由于循环谱使频率从一维平面扩展到二维平面,所以计算复杂度较高.这也是限制循环特征检测应用的最大障碍.

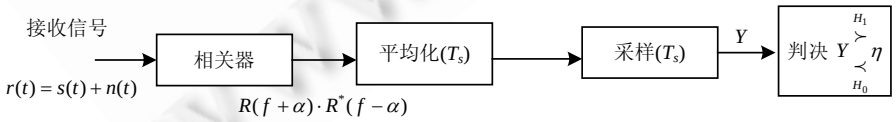


Fig.4 Cyclostationary detection diagram

图 4 循环特征检测法框图

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

基于发射机的频谱感测基础技术基本上包含以上几种.为了提高精度,一些新的算法也被应用到不同的感测技术中,如贝叶斯算法、NP(Neyman-Pearson)理论、随机矩阵理论等[13].表 1 给出当前频谱感测的基本技术及其适用性信号比较,图 5 给出了其比较图.

Table 1 Comparison of basic spectrum sensing technologies

表 1 当前频谱感测的基本技术

技术方法	适用信号	复杂性	精度
ED	未知或白信号	简单	低
MF	具有窄带前导的白信号	复杂	高
CD	具有循环特征信号	较复杂	较高

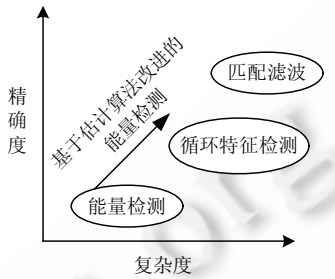


Fig.5 Performance comparison of the spectrum sensing technologies(based on Ref.[8])

图 5 频谱感测技术性能比较图(基于文献[8]改进)

2.2 协同频谱感知和调度优化

由于单节点频谱感知结果受无线环境的影响比较大,为了更准确地获得频谱资源信息,不少学者提出了基于协同的频谱感知方法,其基本结构如图 6 所示.

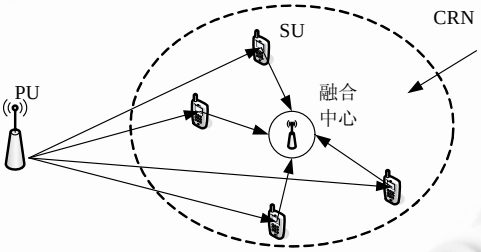


Fig.6 Cooperative spectrum sensing

图 6 协同频谱感知示意图

协同频谱感知一般包含 3 个阶段:感知(sensing)、传送(reporting)、判决(decision making).

在传送阶段,所有 SU 将本地感测量传送到融合中心,随后由融合中心对 PU 的活跃性进行判决.根据 SUs 交换信息的不同,传送类型一般有 3 种:硬联合(hard combination)、软联合(soft combination)以及软化的硬联合(softened hard combination).硬联合是 SU 仅传送其 1 比特自身判决值,这种方法往往可以确定协同感知性能的下界,有时也被称为决策融合(decision fusion);软联合则是 SU 将原始测量信息全部传送到融合中心,也被称为数据融合(data fusion),这种方法可以确定协同感知性能的上界,但往往带来较大的协议开销;软化的硬联合则是 SU 选取本地感测信息的几个比特进行传送,文献[14]研究指出,选取感测信息的 2bits~3bits 者进行融合,可以较好地在复杂度与检测性能方面取得折衷.

在判决阶段,融合中心节点根据汇聚信息,基于一定规则进行融合判断.当前一些研究基本都是在能量检测基础上进行的,常见的协作频谱判决方法主要有 AND 算法、OR 算法、计数算法、分区算法、似然比算法、

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

线性加权算法和 DWCS 算法等[15].

协同频谱检测由于其健壮的检测性能日益受到人们的关注,但协同感测存在如何将信息共享及减少协议开销折衷等问题.具体表现为:

(1) 协同 SU 节点要实现信息的交互必须建立一个专门的控制信道,而且对于异构网络协同节点间还需要预先获知相应的波形参数、包结构及接入控制协议;

(2) 协同 SU 节点的数目必须精心选取,因为参与协作的节点数目越多,其开销也就越大.同时,当节点数目达到一定值后,继续增加协作节点数目未必能够给检测性能带来变化;

(3) 协作节点的可信问题也是影响协同感知的一个重要因素.如果某个协作节点存在恶意行为,有可能使得协同感知结果误判.

频谱感测调度是回答以何种顺序感测信道以及感测频次及时长多少的问题,它决定了对频谱接入机会获取的效率.在频谱感测调度方面,文献[16]进行了较为深入的研究,它基于部分观察马尔可夫链推导了感测调度周期与网络吞吐量之间的关系;同时,它还对感测精度对信道接入的影响作了一定的研究.文献[17]则对信道探测感知次序的最优化问题进行了研究,它构造了联合信道感知和传输策略的 SU 传输性能最优化模型,基于对信道状态分布已知的假设,给出了信道感测次序、探测起止时长以及信道选择方法.相关的研究还有文献[18]等.

2.3 挑战及方向

频谱感测算法存在着计算复杂度与感测精度之间的矛盾,如图 5 所示.在感测的硬件平台设计方面,当前的 GNU,NSRP 以及 XG 平台均采用 ED 检测方法,还未见其他算法应用到实际 CR 平台检测中.当前,频谱感测还存在以下几个方面的挑战:

(1) 大带宽、高分辨率的频谱感测在硬件实现上还存在困难,主要是其需要配置高采样、大动态范围以及大带宽的射频前端和 A/D,同时对数据处理延时要求也很高.近年来,信号信息处理的新技术压缩感知(compressed sensing,简称 CS)提供了一种利用低维观测数据有效感知并重构稀疏信号的新方法,一些学者利用 CS 理论开展了频谱感知的研究.如:Tian 等人[19]首先在宽带认知无线电中引入了 CS 理论,利用小波变换进行频谱边缘检测,然而该方法依然需要高速 ADC 进行宽带信号采样;文献[20]在该方面做出了改进,利用模拟/信息转换器(analog-to-information converter,简称 AIC)实现了宽带模拟信号信息获取方式,最后采用能量检测方法判断频谱占用情况.但这种基于 CS 理论的感测算法需要重构出信号的频域表达形式,在获取原信号完整信息的基础上进行频谱感知.由于宽带信号的频域稀疏系数远远大于信道数目,这种方法极大地增加了系统的复杂度.因此,在如何降低计算复杂度及保证重构精度方面,还需要更进一步地加以研究;

(2) 隐 PU 检测问题.对隐 PU 检测的最佳方法是采用多 CR 节点的协同,但这无疑会带来额外的协议开销,同时还会存在对 PU 检测信息的延时.因此,如何在感测精度与感测信息共享开销上取得折衷优化,也是具有挑战性的;

(3) 采取自适应调制技术 PU 的检测问题.如果 PU 是采取自适应技术传输,如何采取有效算法实现对不同调制的信号进行检测,将面临较大的挑战.比如对自适应调制扩频信号,就不能简单地利用能量检测法进行检测;

(4) 对于 SU 处于移动中的感知技术仍具有挑战性.这是因为基于感知算法获得的频谱分配图,可能因为 SU 节点的移动性而过时;

(5) 如何优化设计频谱感测周期.由于频谱感测周期长短直接决定了 PU 检测的准确度及快速性,而短周期频谱检测又会带来传输效率的下降,所以,如何基于 PU 环境信息实现对频谱感测周期的优化设定,也是非常重要的.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3 面向认知无线网络的 MAC 协议设计

当前,面向认知无线网络的 MAC 设计主要是从以下 4 个方面进行研究:频谱分配模式、协议实现结构、频谱共享行为以及频谱接入方式.按频谱分配模式可分为 overlay 和 underlay 两种方式;按结构分为集中式、分布式,集中式需要一个集中控制器或协调器;按频谱共享行为分为合作式和非合作式;按频谱接入方式分为竞争模式和非竞争模式.

下面以频谱分配模式为主线分别介绍当前 CRN MAC 研究的进展情况.

3.1 Overlay

在 overlay 共享模式下,CR 用户(SU)只在空闲信道发起传输,一旦发现 PU 使用该信道,则 SU 立即释放对信道的占用.由于在该模式下 SU 需要时刻获取 PU 活跃信息,所以不能连续进行数据传输,这在一定程度上限制了网络吞吐量.

3.1.1 基于非竞争接入方式的 CRN MAC

基于非竞争接入方式的 CRN MAC,目前主要是基于时槽分配,比较典型的有 IEEE 802.22,C-MAC 等.

在 IEEE 802.22 标准中,SU 被定义为 CPE(customer premises equipment),PU 一般为模拟 TV、数字 TV 或无线麦克风,中心基站负责协调 CPE 并决定其工作使用频谱.在信道接入方式上,当前草稿仍使用 TDD 模式.其 MAC 层不仅引入了使各覆盖区域相重叠的基站(base station,简称 BS)协调共享无线频谱的 CBP(coexistence beacon protocol),同时加入了信道管理和测量功能,以更加灵活、有效地实现频谱管理.在当前 IEEE 802.22 草稿中,BS 与 CPEs 均采取周期性的频谱感测策略,即周期性暂停传输以感测频谱信息,CPEs 将感测到的信道状况传送到 BS,BS 汇总后判决当前信道是否已被 PU 占用,如果被占用,则启用备用信道发起传输[21,22].

C-MAC(cognitive MAC)协议是由 Cordeiro 和 Hallapali 提出来的,其核心是定义两类信道:一个是 RC (rendezvous channel)信道,负责网络间通信、邻居发现、PU 检测以及搜集每个频带负载情况;另一个是 BC (backup channel)信道,主要用于 PU 重启时,CR 用户用于切换的备选信道.在 C-MAC 中,定义了一种超帧,其包括信标段 BP(beacon period)和数据传输段 DTP(data transfer period),如图 7 所示[23].

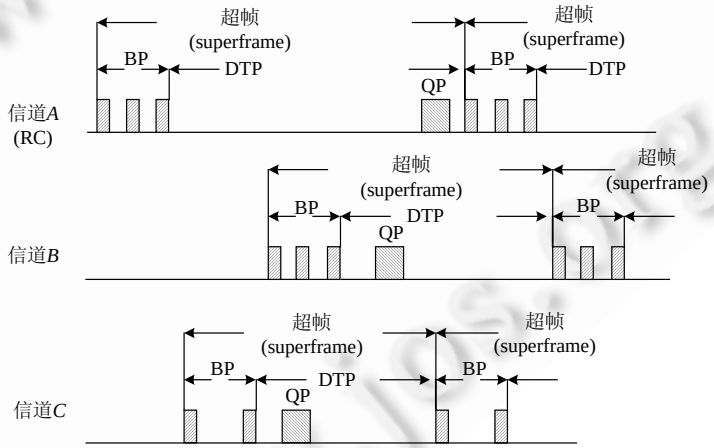


Fig.7 C-MAC scheduling structure[23]

图 7 C-MAC 工作时序图[23]

C-MAC 工作过程如下:上电初始化时,每个 CR 扫描可用频谱形成频谱空洞,然后监听其他 CR 广播的信标:如果侦听到某个频谱上的信标,则基于该信标的 RC 位设置情况设定全局 RC;如果在一个超帧时间内没有收到任何信标,则随机地从频谱洞中选择一个信道作为 RC,并在广播信标中将 RC 置位.一旦 RC 确定后,CR 将通过 RC 在 BP 段把其他可用频谱洞信息通知其他 CR.同时,为了保证获知每个 CR 切换到其他信道的信息,C-MAC

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

还规定 CR 必须周期性地切换到 RC 信道上以完成信息交换和同步.在 C-MAC 中,其感测分为带内(in-band)感测和带外(out-band)感测,具体如下:在每个超帧的 DTP 内分配一个 QP(quiet period),当前信道上的 CR 在 QP 进行带内感测,而在其他信道上的 CR 则进行带外检测.每个超帧的 BP 前两个时槽用于存放新加入该信道的 SUs 表示,其他时槽用于其他 CR 发送信标.

C-MAC 的主要特点是不需要 CCC(common control channel),但是要求全网采用一个 RC.由于信道的时空性,这对于多跳网络是不现实的.另外,所有 CR 的信标都在超帧的 BP 段发送,这对于网络的可扩展性也是不利的;还有就是在没有处理中心的情况下,实现每个信道上 BP 与 QP 的时域不重叠也是非常困难的.

3.1.2 基于竞争接入方式的 CRN MAC

基于竞争接入方式的 CRN MAC 比较典型的有 HC-MAC(hardware constrained MAC),AAF-MAC(adaptive ad-hoc freeband),SCA-MAC(statistical channel allocation based MAC),SMA(stochastic medium access)以及 ECMA392.

(a) HC-MAC 和 SMA

HC-MAC 协议的提出,主要是用于解决实际 CRN 中频谱感测受限和传输受限的问题[24].频谱感测受限主要是指感测信道数与感测准确度之间的矛盾,因为当分配到某个信道的时间占用越久,感测的信道数越少,感测准确度也就越低.传输受限主要是指在 OFDM 中由于受带宽范围的限制,子载波数是受限的.该协议的工作过程分为 3 个阶段:竞争、感测与传输.在竞争阶段,CR 通过在 CCC 上传输 C-RTS 和 C-CTS 包竞争介入信道,其信道接入过程类似于 IEEE 802.11DCF;竞争成功后,则在其感测到的每个空闲信道上交换 S-RTS 和 S-CTS 包,以共享感测信道信息列表,在每个感测循环后,基于停止准则判定是否继续下一个信道的感测;当频谱感测完成后,通信节点将在所获空闲信道上传输数据,当数据传输完成后,其通过在 CCC 上交互 T-RTS 与 T-CTS 通知其他节点,并释放占用信道.

考虑到 CCC 往往并非是真实存在的,Wang 等人提出了一种基于随机握手机制选取 CCC 的 SAM 协议[25].其基本实现方法是,SU 源节点首先基于 MCMC(Markov-chain Monte-Carlo)方法以最大成功交互概率为准则选择一定的可用信道集,然后逐次发送 RTS 包到目的节点,如果目的节点成功接收到 RTS 包,则建立公共可用信道集.在 RTS-CTS 交互完成后,将数据在所有公共信道上进行传输.

(b) AAF-MAC

AAF-MAC 由 Pawelczak 等人提出[26],其工作机制是基于 802.11 DCF 的扩展,且协议是建立在每个 xGEN 节点具备射频硬件可重构基础上的.协议的核心思想是使每个 xGEN 节点存放 FOI(frequency occupancy information)和 CAL(channel availability list)表,其中,FOI 记录邻居节点的地址、信道使用信息,CAL 由实时频谱感测进行更新;当两个认知节点进行通信时,其首先通过 CCC 基于 RTS/CTS 匹配 CAL,一旦匹配上,便基于所选信道进行数据传输.

该协议的主要缺点是需要一个额外的 CCC,并且需要节点配备软件定义无线电结构.对此,Su 等人[27]提出了 CREAM-MAC(cognitive radio-enabled multi-channel MAC),其实现方法与 DCA-MAC 类似,只是 AAF-MAC 采用一个收发模块,通过时分的方式切换不同信道控制信息的传输和数据的传输.

(c) SCA-MAC

SCA-MAC 由 Hsu 等人提出[28],其工作机制是基于 CSMA/CA 的扩展,且建立在一个 CCC 基础之上.

SCA-MAC 协议包含 3 个阶段:环境感知与学习、CRTS/CCTS 信息交换、DATA 及 ACK 传输,其工作时序如图 8 所示.

- 在环境感知与学习阶段,主要是基于连续周期性时间调度实现对频谱的感测以获取频谱空洞;
- 在 CRTS/CCTS 信息交换阶段,其信道接入过程类似于标准 CSM/CA 机制,只是在 CCTS 中被指定携带 CA(collision avoidance)窗口信息,该 CA 窗口设定值基于公式(2),其中,n 是接收机的邻居节点数;
- 在 DATA 及 ACK 传输阶段,发送节点通过优化工作范围、最大化信道汇聚以及最近信道空闲等准则,根据信道选择成功率统计及预测结果,选择 DATA 信道,并在传输前退避 CA 窗口,如图 8 所示.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$N = |CA| = \begin{cases} 2, & n = 0 \\ 2^n, & 1 \leqslant n < 5 \\ 32, & n > 5 \end{cases} \tag{2}$$

该协议的主要缺点是需要一个额外的 CCC,并且需要精确的频谱感知,但其并未将计算开销考虑在内.

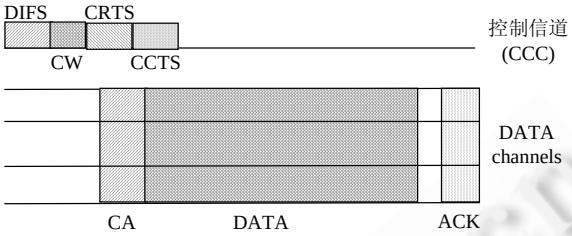


Fig.8 Working principle of SCA-MAC[28]

图 8 SCA-MAC 工作过程框图[28]

(d) ECMA392

为了实现个人便携式终端工作于空闲 TV 波段,在 2009 年 12 月,由认知网络联盟(cognitive networking alliance,简称 CogNeA)制定了 ECMA(european computer manufacturers assocation)392 标准,该标准主要是为个人终端、家庭终端、外设等提供短距离高速视频流服务[29].

在 ECMA 392 标准中,CR 节点可以工作于 Master-slave 模式或 P2P 模式.为了使 CR 节点协调工作,在该标准的每个信道中定义了一种超帧结构,如图 9 所示.

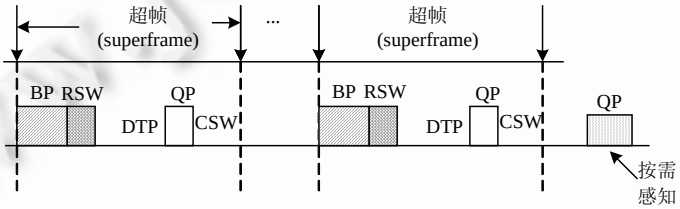


Fig.9 Superframe structure in ECMA 392[29]

图 9 ECMA 392 标准超帧结构图[29]

该超帧包括 BP(beacon period)、预约信号窗口(reservation based signalling window,简称 RSW)、数据传输段(data transfer period,简称 DTP)、静默阶段(quiet period,简称 QP)以及竞争信号窗口(contention signalling window,简称 CSW).其中,

- BP 用以存放在该信道上处于联盟的所有 CR(被称为 regular beaconing device,简称 RBD)的 beacon,所以其长度由这些 RBD 数量决定;
- RSW 只在工作于 Master-slave 模式时才使用;
- QP 用来为 CR 节点感知信道提供时段;
- CSW 用来交换信道状态信息.

ECMA 392 标准的接入过程如下(以 P2P 模式为例):对于新加入的 CR 节点,首先执行初始信道扫描和节点发现操作,在每个信道上的执行时间一般设定为两个超帧时长,通过能量检测和特征检测方法判断出是否存在其他 SU 和 PU.如果检测到 SU 发出的 Beacon 包,则标示信道存在其他 SU,并通过其获取信道状态信息;如果检测到 PU,则标示信道存在 PU,并切换到其他信道进行感测.然后,CR 节点执行创建 BG(beacon group)或同步已有 BG 的过程,如果 CR 通信节点对不能同步到同一个 BG 中,还需要执行配对(pairing)过程.最后,根据 CR 源节点的 QoS 需求选择满足一定带宽的信道发起数据传输.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3.1.3 混合接入方式

(a) OS-MAC

OS-MAC(opportunistic spectrum MAC)由 Hamdaoui 和 Shin 等人提出,其协议只要求单个收发机,但是从频谱感测的角度则需要多天线支持.OS-MAC 的核心思想是建立群的概念,即将网络分成不同的群(group),每个群内成员选择相同的信道传输数据,这个信道由群头根据与其他群头的信道负载信息交换决定的,群与群的信息交换通过 CCC 来实现.OS-MAC 的工作过程分为 3 个阶段:选择、推举、更新:

- 在选择阶段,由群头根据其获得的其他群信道的使用情况来确定最佳数据传输信道,并广播给群内用户;
- 在推举阶段,每个群内的用户以 802.11 DCF 方式竞争信道,最先发送数据包者即被选为群头;
- 在更新阶段,群头以根据特定时槽基于 CCC 传输当前本群的信道负载情况,并在其他时槽获取其他信道的负载信息,更新阶段后进入选择阶段确定最优信道[30].

该协议的优点是只需一个收发机,但是该协议没有对 PU 的保护;而且全网需要统一的 CCC,也限定了容量,存在饱和问题.

(b) SYN-MAC

SYN-MAC(synchronized MAC)协议由 Kondareddy 和 Agrawal 提出[31],其算法是建立在每个 CR 同时配备控制收发机(control radio)和数据收发机(data radio)基础上的.协议的核心思想是在不同的时槽分配不同的信道.其工作过程如下:在网络初始化时,第 1 个 CR 将把最大可用的 N 个信道分配到 N 个等间隔的时槽内,并分别以各个时槽分配的信道发送信标,其他 CR 则将控制收发机调谐到一个可用信道上.如果其接收到信标,则与初始 CR 在该信道上进行信息交互;如果在 N 个时槽内没有收到任何信标,则被认定为第 1 节点.如图 10 所示,当某个 CR 欲在某一信道发起传输时,需等到信道分配的相应时槽,并调谐到该信道发起信标,其传输模式类似于 802.11 DCF,所以是一种混合接入模式,接收者根据控制信息与其交互并实现在该信道的数据传输.

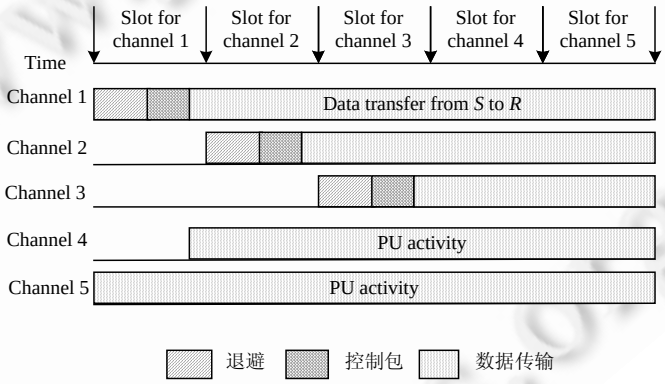


Fig.10 Channel control processing in SYN-MAC

图 10 SYN-MAC 信道控制图

SYN-MAC 的优点是不需要 CCC,但是需要配置多收发机.另外,由于每个信道只在特定时槽内进行,因此,当 PU 占用某个信道时,CR 并不能快速获取占用信息并释放信道,从而会对 PU 传输带来干扰.

(c) O-MAC (opportunistic MAC)

O-MAC 协议是基于 SU 配置两部收发装置,其中一个固定于 CCC 信道,用于交互控制信息;另外一个可切换到任意信道,用于感测信道占用情况及传输数据[7].O-MAC 协议的核心思想是,在 CCC 信道划分一定时槽,每个时槽分配 reporting 段和 negotiating 段.在 reporting 段,又根据授权信道数 n 依次划分出 n 个微槽,每个微槽对应一个不同授权信道.在 reporting 段,每个 CR 用户通过控制信息收发机监听控制信息,而另一个收发装置则在每个微槽内随机监听一个授权信道,一旦其发现该授权信道空闲,便通过 CCC 收发机在该授权信道对应的微槽

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

内发送信标,其余 SU 便通过该信标信息获知该授权信道可用.在 negotiating 段,如果某个 SU 欲在某个空闲授权信道发起传输,其通过控制信息收发机以 p-persistent CSMA 信道接入方式,并在 CCC 发送 RTS 到接收方.CR 接收方控制信息收发机接收到 RTS 后,比较可用信道列表并返回 CTS,发送方接收到 CTS 后,按设定的信道传输数据.

O-MAC 协议的主要缺点是需要两个收发机,而且控制信息收发机必须固定于特定信道;再者,该协议需要严格的同步,以实现信息共享与交互;另外,该协议还需 CR 节点获取授权信道数量的先验知识.

3.2 Underlay

在 underlay 频谱共享模式下,PU 和 SU 共存占用信道,但前提是 PU 接收端接收到的总干扰满足信干比(SIR)要求最低限.这里,我们主要介绍几个比较典型的 underlay 共享模式的认知 MAC 协议.

3.2.1 CSMA-CR[32]

Lien 提出了一种 CSMA-CR(carrier sensing based multiple access for cognitive radio)协议,该协议主要应用在 PU 与 CR 均为中心基站式信道接入的场景.假定 PU 采用传统 CSMA 方式接入到 PU 基站,CR 用户通过设定比 PU 更长载波侦听周期保证 PU 的优先权.同时,为了保证 CR 的传输质量,CR 可自适应地调整自身调制和编码方式,以容忍来自 PU 的干扰.CSMA-MAC 工作过程如下:当 CR 欲发起传输时,其先监听信道,如果信道忙,将继续监听一个时段.如果在监听时段尾部发现信道处于空闲或忙状态,CR 将发射 RTS 到 CR 基站竞争信道.如果 CR 基站接收到 RTS,则计算可容忍干扰下的传输功率及速率,如果可以获得该传输功率及速率,便将该信息包含于 CTS 内并发送给源 CR 节点,否则将不返回 CTS.如果 CR 节点能够收到该 CTS 包,则将按所要求的传输功率及速率传输数据,在收到 ACK 后被认为传输成功.

CSMA-CR 协议可以实现与主用户网络的共存,但其要求 CR 基站必须能够准确估计 PU 干扰并能计算出所需传输功率及速率,同时需要获知主用户网的载波监听周期以设定 CR 载波监听时间;再者,该协议需要主用户网也采用 CSMA 协议接入信道.

3.2.2 DC-MAC[16]

DC-MAC 协议由 Zhao 等人提出,其基本思想是,通过协同优化认知节点收发双方的频谱感测信息及信道接入控制,实现对认知节点受限感测情况的数据传输.DC-MAC 假定每个认知节点用户可以从 PU 获取时槽信息,故将每个认知用户对分配到每个时槽(slot),在每个 slot 内,连续完成频谱感测、RTS/CTS 传输、DATA 传输及 ACK 传输.在频谱感测阶段,CR 发送方及接收方根据 POMDP(partially observable Markov decision process),以有效吞吐量为收益函数,决策选择哪些频段进行感测,哪些频段用于数据传输.在 RTS-CTS-DATA-ACK 过程中,其模式类似于标准 CSMA.DC-MAC 的一个典型特点是,首次将学习技术融入到协议中,即其通过积累历史频谱使用信息,判断获取哪一个信道更适于长期最佳.同时,为了降低决策优化复杂度,Zhao 等人还提出了一种次优贪婪算法,可以保证认知用户收发双方均选择相同优化信道进行感测,并将收益作为下一个时槽的输入.

DC-MAC 的一个优点是其不需要 CCC,每个认知用户收发对均可基于初始化握手及同步跳频完成同步.

3.2.3 DySPAN-SC 相关标准[33]

IEEE DySPAN-SC(dynamic spectrum access network standards committee)原来为 IEEE SCC41(IEEE standardization coordinating committee 41),旨在为下一代无线通信提供动态频谱分配、干扰管理、无线系统协调以及频谱管理等技术标准.当前,该标准的草稿包含 7 个主题部分,即 IEEE 1900.1~IEEE 1900.7.DySPAN- SC 的主要特点是定义了更高层(高于 MAC 层和物理层)的协议规范,其中,频谱感测接口主要在 IEEE 1900.6 中定义,MAC 层则主要包含在 IEEE 1900.7,目前仍在制定过程中.在 IEEE 1900.6 中定义了感知信息相互交换的通用接口和数据结构,而对于何种感知技术没有限制,使得无论采用何种方式的感知信息都可实现共享.在 IEEE 1900.2 中定义了带内及邻带内的干扰测量及共存方法.当前,DySPAN-SC 正在朝着为固定和移动用户 QoS 保证的动态频谱接入提供服务这一方向而努力[34].

通过对以上面向认知无线网络的 MAC 协议的分析可以看出,频谱感测调度与共享、频谱切换算法是每个协议的重要组成部分,这也是有别于传统无线网络 MAC 的主要特征.从对硬件的要求上看,关键在于对 CCC 的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

实现需求,如采用单收发机则必须在时域为 CCC 设定时槽,如协议 HC-MAC,SCA-MAC,OS-MAC 等;而采用多收发机则可固定一个 CCC,如协议 AAF-MAC,O-MAC 等.SMA,DC-MAC 也提出了一种不需要 CCC 的思路,表 2 给出了几种 MAC 协议的性能比较.

但上述协议对在 CR 用户间同信道干扰及多跳情况下的信道接入未作研究,因为在 PS 与 CRS 共存的网络中,隐藏终端的问题将会更加严重,主要是因为频谱的切换与传输功率的多样性[30].

Table 2 Characteristics comparison of CRN MAC protocols (based on Ref.[30])

表 2 CRN MAC 协议性能比较表(基于文献[30]改进)

协议名称	频谱监听方式	频谱接入方式	实现架构	频谱共享模式	收发装置需求	CCC 需求	同步需求
802.22	周期性	TDD	中心式	Overlay	单收发机	不需要	需要
ECMA392	周期性/按需	竞争方式	分布式	Overlay	单收发机	不需要	不需要
DySPAN-SC	优化调度	竞争方式	分布式	Underlay	单收发机	不需要	不需要
C-MAC	周期性	TDD	分布式	Overlay	单收发机	不需要	需要
HC-MAC	停止准则检测	竞争方式	分布式	Overlay	单收发机	需要	不需要
SMA	周期性	竞争方式	分布式	Overlay	单收发机	不需要	不需要
AAF-MAC	周期性	竞争方式	分布式	Overlay	多收发机	需要	不需要
SCA-MAC	周期性	竞争方式	分布式	Overlay	单收发机	需要	不需要
SYN-MAC	周期性	混合式	分布式	Overlay	两部收发机	不需要	需要
OS-MAC	周期性	混合式	分布式	Overlay	单收发机	需要	需要
O-MAC	周期性	混合式	分布式	Overlay	两部收发机	需要	需要
CSMA-CR	按需	竞争方式	分布式	Underlay	单收发机	不需要	不需要
DC-MAC	周期性	竞争方式	分布式	Underlay	单收发机	不需要	需要

4 挑战及方向

认知无线网络不仅可以动态接入授权频谱,还可以接入其他非授权频谱.因此,认知无线网络与不同架构网络(包括其他架构的认知无线网)的共存问题将是必须要解决的.当前,国际上的研究热点主要体现在对授权频谱的动态接入,这对于认知无线网络从理论到应用的实现具有最直接的实际应用效应;但对非授权频谱的动态接入则显得更急迫,比如日益拥挤的 2.4GHz 频段.目前,DySPAN-SC 工作组正在开展相关的研究.

动态频谱接入信息交互,是当前认知无线网络最具挑战性的一个研究内容,不仅要考虑信息交互带来的额外协议开销,还必须考虑信息交互模式的选择,以便解决 CCC 的饱和问题.

在跨层认知服务支持方面,当前国内外研究机构大多主要集中于 MAC/PHY 的跨层融合,而对 MAC、路由跨层认知服务支持研究还较少.但我们知道,路由选择在很大程度上影响到 MAC 层的频谱感测方向性选择、频谱的动态切换以及自适应链路控制.同时,MAC 层信息对于多跳路由选择、可靠性路由设计等也紧密相关.

在 MAC 层安全机制方面,CRN 除同样面临传统无线网络的很多安全问题以外,还面临着一些新的安全隐患,比如偏袒效用攻击、异步感知攻击、虚假反馈攻击、饱和控制信道攻击等[5].因此,在 MAC 层如何提高其安全机制仍需进行深入的研究.

在认知无线网络 MAC 设计性能评估指标方面,当前还没有形成公认的标准,基本上还是沿用传统网络吞吐量等作为性能评价指标,但认知无线网络作为一种“频谱二次利用”技术,应当更突出认知用户需求满足度及 PS 系统被干扰度等.

5 结 论

本文对认知无线网络的 MAC 层设计问题进行了探讨,并针对认知无线网络的 MAC 的特性及需求进行了分析;之后,对设计 MAC 频谱感知技术、信道接入技术、频谱共享技术等相关研究进展进行了归类分析;最后,指出了当前所面临的主要研究难点及挑战,并提出了一些方向性建议.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

References:

[1] Mitola III J, Maguire Jr GQ. Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 1999,6(4): 13−18. [doi: 10.1109/98.788210]

[2] Wang J, Ghosh M, Challapali K. Emerging cognitive radio applications: A survey. IEEE Communications Magazine, 2011,49(3):74−81. [doi: 10.1109/MCOM.2011.5723803]

[3] Zhang P, Feng ZY. Cognitive Radio Network. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese).

[4] Wang JL, Wu QH, Gong YP, Song F. Cognitive Radio Network. Beijing: China Machine Press, 2010 (in Chinese).

[5] Ceng ZM, Guo CL. MAC in CRN. ZTE Technology, 2009,15(2):20−24 (in Chinese with English abstract).

[6] Wyglynski A, Nekovee M, Hou T. Cognitive Radio Communication and Networks: Principle and Practice. London: Academic Press, 2010.

[7] Cormio C, Chowdhury KR. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. Ad Hoc Networks , 2009,7(7):1315−1329. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.002]

[8] Simon H. Cognitive radio: Brain-Empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201−220. [doi: 10.1109/JSAC.2004.839380]

[9] Yücek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009,11(1):116−130. [doi: 10.1109/SURV.2009.090109]

[10] Kamil NH, Yuan XH. Detection proposal schemes for spectrum sensing in cognitive radio. Wireless Sensor Network, 2010,2(5): 365−372. [doi: 10.4236/wsn.2010.24048]

[11] Tian Z, Giannakis GB. A wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2007). Mykonos: IEEE Press, 2007. 1−5. [doi: 10.1109/ CROWNCOM.2006.363459]

[12] Gardner WA, Napolitano A, Paura L. Cyclostationarity: Half a century of research. Signal Processing, 2006,86(4):639−697. [doi: 10.1016/j.sigpro.2005.06.016]

[13] Zeng YH, Liang YC, Hoang AT, Zhang R. A review on spectrum sensing for cognitive radio: Challenges and solutions. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010,(2):1−15. [doi: 10.1155/2010/381465]

[14] Ma J, Li Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE GlobeCom. Washington: IEEE Press, 2007. 3139−3143. [doi: 10.1109/GLOCOM.2007.594]

[15] Cardoso LS, Debbah M, Bianchi P. Cooperative spectrum sensing using random matrix theory. In: Proc. of the ISWPC 2008. Santorini: IEEE Press, 2008. 334−338. [doi: 10.1109/ISWPC.2008.4556225]

[16] Zhao Q, Tong L, Swami A, Chen Y. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 2007,25(3):589−600. [doi: 10.1109/JSAC.2007.070409]

[17] Chang NB, Liu M. Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic spectrum access. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2009,17(6):1805−1818. [doi: 10.1109/TNET.2009.2014460]

[18] Huang S, Liu X, Ding Z. Optimal sensing-transmission structure for dynamic spectrum access. In: Proc. of the IEEE InfoCom 2009. Rio de Janeiro: IEEE Press, 2009. 1−9. [doi: 10.1109/INFCOM.2009.5062155]

[19] Tian Z, Giannakis GB. Compressed sensing for wideband cognitive radios. In: Proc. of the Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Honolulu: IEEE Press, 2007. 1357−1360. [doi: 10.1109/ICASSP.2007.367330]

[20] Polo YL, Wang Y, Pandharipande A. Compressive wide-band spectrum sensing. In: Proc. of the Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, San Diego: IEEE Press, 2009. 178−183. [doi: 10.1109/ICASSP.2009.4960089]

[21] IEEE 802.22. http://www.ieee802.org/22/

[22] Stevenson C, Chouinard G, Lei Z, Hu W, Shellhammer S, Caldwell W. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. IEEE Communications Magazine, 2009,47(1):130−138. [doi: 10.1109/MCOM.2009.4752688]

[23] Cordeiro C, Challapali K. C-MAC: A cognitive MAC protocol for multichannel wireless networks. In: Proc. of the IEEE DySPAN. Dublin: IEEE Press, 2007. 147−157. [doi: 10.1109/DYSPAN.2007.27]

[24] Jia J, Zhang Q, Shen X. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 2008,26(1):106−117 [doi: 10.1109/JSAC.2008.080110]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[25] Wang X, Wong A, Ho PH. Stochastic medium access for cognitive radio ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 2011,29(4):770−783. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110409]

[26] Pawelczak P, Hoeksema F, Prasad RV, Hekmat R. Niemegeers, dynamic spectrum access: An emergency network case study. In: Proc. of the IEEE DySPAN. Singapore: IEEE Press, 2010. 601−606.

[27] Su H, Zhang X. Cross-Layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(1):118−129. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080111]

[28] Hsu A, Wei D, Kuo J. A coggnitive MAC protocol using statistical channel allocation for Ad-hoc network. In: Proc. of the IEEE WCNC. Hongkong: IEEE Press, 2007. 1213−1218. [doi: 10.1109/WCNC.2007.25]

[29] ECMA Int'l. MAC and DHY for operation in TV white space. Ecma Int'l Standard, ECMA 392, 2009.

[30] Xiang J, Zhang Y, Skeie T. Medium access control protocols in cognitive radio networks. Wireless Communications & Mobile Computing, 2010,10(1):11−28. [doi: 10.1002/wcm.v10:1]

[31] Kondareddy YR, Agrawal P. Synchronized MAC protocol for multihop cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Beijing: IEEE Press, 2008. 3198−3202. [doi: 10.1109/ICC.2008.602]

[32] Lien SY, Tseng CC, Chen KC. Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications 2008 (ICC 2008). Beijing: IEEE Press, 2008. 3208−3214. [doi: 10.1109/ICC.2008.604]

[33] IEEE DySPAN-SC. http://www.dyspan-sc.org

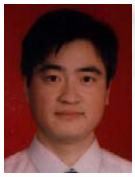
[34] Murroni M, Prasad RV, Marques P, Bochow B, Noguet D, Sun C, Moessner K, Harada H. IEEE 1900.6: Spectrum sensing interfaces and data structures for dynamic spectrum access and other advanced radio communication systems standard: Technical aspects and future outlook. IEEE Communications Magazine, 2011,49(12):118−127. [doi: 10.1109/MCOM.2011.6094015]

附中文参考文献:

[3] 张平,冯志勇.认知无线网络.北京:科学出版社,2011.

[4] 王金龙,吴启晖,龚玉萍,宋绯.认知无线网络.北京:机械工业出版社,2010.

[5] 曾志民,郭彩丽.认知无线电网络的 MAC 层关键技术.中兴通讯技术,2009,15(2):20−24.



阚保强(1980－),男,山东济宁人,博士,工程师,主要研究领域为无线网络,软件无线电,低功耗电路设计.

王建业(1964－),男,教授,主要研究领域为无线通信,雷达系统,人工智能.

范建华(1971－),男,博士,研究员,主要研究领域为软件无线电,Ad Hoc 网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn