

# 认知无线电自组织网络 MAC 协议

罗涛<sup>1),2)</sup>, 赵明<sup>1)</sup>, 李静叶<sup>1)</sup>, 乐光新<sup>1)</sup>, 王小军<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(北京邮电大学 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 中国 100876)

<sup>2)</sup>(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 中国 710071)

<sup>3)</sup>(都柏林城市大学 网络与通信工程研究院, 都柏林 爱尔兰 Dublin 9)

**摘要** 随着无线频谱资源短缺问题的日益突出, 认知无线网络得到了广泛关注和研究。在这类网络中, 媒体接入控制 (Medium Access Control, MAC) 协议是关键技术之一。特别是在认知无线电自组织网络中, 因为缺乏中心基础设施的支持, MAC 协议的设计面临着巨大的挑战: 除了媒体接入控制等传统问题之外, 这些挑战还包括如何保证主用户的业务质量, 如何有效认知并管理频谱资源等。本文首先介绍了认知无线电自组织网络 MAC 协议的最新研究进展, 然后对一些典型协议进行了比较分析, 最后对未来的研究方向进行了探讨。

**关键词** 认知无线电; MAC 协议; 自组织网络

**中图法分类号** TN911.22 **DOI 号:** \*\*

## MAC Protocols in Cognitive Radio Ad Hoc Networks

LUO Tao<sup>1),2)+</sup>, ZHAO Ming<sup>1)</sup>, LI Jing-Ye<sup>1)</sup>, YUE Guang-Xin<sup>1)</sup>, WANG Xiao-Jun<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

<sup>2)</sup>(The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>3)</sup>(Research Institute for Networks and Communications Engineering, Dublin City University, Dublin 9, Ireland)

**Abstract** As the issue of scarcity of wireless spectrum resources emerges, the cognitive radio networks have gained extensive attention and investigation. In these networks, the medium access control (MAC) protocol is one of the key technologies. Particularly in the cognitive radio ad hoc networks, the design of MAC protocols confronts with great challenges because of the lack of infrastructures. Besides the traditional issues such as the medium access control, these challenges include how to guarantee the service quality of primary users, how to efficiently sense and manage the spectrum resources and so on. This paper surveys the up-to-date advances in the field of MAC protocols in cognitive radio ad hoc networks. It first introduces some recent MAC protocols in cognitive radio ad hoc networks, then compares various existing works, finally analyzes and discusses the future research directions.

**Key words** cognitive radio; MAC protocol; ad hoc networks

## 1 引言

随着无线通信新业务和新产品的不断出现, 无

线通信市场对于无线频谱资源的需求不断增加。在现行的静态频谱分配政策下, 某些特定频段已经非常拥挤, 几乎很难再提供新的频谱资源。与此同时, 很多已授权频段的频谱使用效率低下, 存在着大量

本课题得到国家自然科学基金(No.61271184)、国家973重点基础研究发展计划(No.2009CB320400)、新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0594)和 ISN国家重点实验室开放基金 (ISN12-03) 项目的资助。

罗涛, 男, 1971年生, 博士, E-mail: tluo@bupt.edu.cn, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为移动通信, 认知无线网络和车辆通信等宽带无线通信系统与网络。赵明, 男, 1984年生, 博士生, E-mail: wrtr2009@gmail.com, 主要研究领域为认知无线网络和动态频谱管理。李静叶, 女, 1984年生, 博士生, E-mail: yezi\_9@qq.com, 主要研究领域为认知无线网络和移动通信。乐光新, 男, 1937年生, E-mail: gxyue@bupt.edu.cn, 教授, 博士生导师, 主要研究领域是数字通信系统与信息处理、宽带无线通信与网络等。王小军, 男, 1961年生, E-mail: xiaojun.wang@dcu.ie, 高级讲师, 博士生导师, 主要研究领域是网络安全应用能量节省的硬件加速技术、异构网络中的业务质量保证和资源优化。

频谱空洞<sup>[1]</sup>。认知无线电技术是解决上述问题的有效途径之一。

认知无线电的最初想法来自于 1999 年 Mitola 的开创性工作<sup>[2]</sup>。目前, 认知无线电存在着多种定义。一般认为, Haykin 教授给出的定义应用较为普遍<sup>[3]</sup>。他认为: 认知无线电是“一种智能的无线通信系统, 它具有基于人工智能技术的学习能力, 能够认知外部环境的变化, 并通过实时改变其自身的某些工作参数, 如工作频率、调制技术、发送功率等, 使其内部状态能够适应无线传播环境的统计性变化, 以便能够充分使用频率资源, 达到可在任何时间任何地点进行可靠通信的目的”。最近, 国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 也给出了一种定义<sup>[4]</sup>。ITU 认为, 认知无线电是“无线电发射机和/或接收器采用的一种可以了解其操作和地理环境、确定对策及其内部状态的技术; 一种能够根据了解到的情况动态和自动调节参数和协议以达到预定目标的技术; 也是一种可从了解到的结果中汲取经验的技术”。显然, 不论哪一种定义, 它们都强调了认知无线电具有学习外部环境的能力和进行自适应调节的能力。要实现这两种能力, 高效的媒体接入控制 (Medium Access Control, MAC) 协议是关键问题之一。

根据现有文献<sup>[5-8]</sup>, 认知无线网络中的 MAC 协议一般具有频谱认知管理、资源分配、媒体接入控制和频谱移动性管理等功能。频谱认知管理是指对多个次级用户的频谱认知活动进行协调<sup>[5]</sup>, 优化物理层频谱认知操作的参数<sup>[6,7,8]</sup>, 准确收集有关频谱使用情况的信息。资源分配是指根据频谱可用信息, 并结合次级用户的业务质量 (Quality of Service, QoS) 需求, 将频谱传输机会分配给次级用户。媒体接入控制功能旨在协调多个次级用户的信道访问行为, 从而避免或减少用户间的碰撞现象。频谱移动性管理则用于实现次级用户在不同空闲信道间的无缝切换, 以避免干扰主用户。

显然, 认知无线网络 MAC 协议和传统无线网络 MAC 协议相比有很多重要区别。首先, 传统无线网络 MAC 协议没有频谱认知功能, 无需区分主用户和次级用户。认知无线网络 MAC 协议则必须利用频谱认知功能获取无线传播环境信息, 同时限制发射功率以保护主用户业务质量等级<sup>[9]</sup>。其次, 传统无线网络 MAC 协议的可用信道是固定的, 而认知无线网络的可用信道则会随时间和空间的不同而发生变化。而且, 由于认知无线网络

MAC 协议维持一定工作状态的时间比较短, 所以认知无线电系统必须周期性地认知信道, 及时获取信道状态信息, 并快速调整工作状态以满足自身的 QoS 需求和对主用户干扰的限制。

根据网络结构的不同, 认知无线网络可以分为基于基础设施的网络或者自组织网络两大类。基于基础设施的认知无线网络中所使用的 MAC 协议可以利用中心节点的控制和协调能力, 设计相对简单。而认知无线电自组织网络 MAC 协议则由于无法利用中心控制节点的协调功能和处理能力, 在频谱感知, 资源管理, 接入控制等方面将会面临更大的设计挑战。因此, 本文主要关注认知无线电自组织网络 MAC 协议方面的研究进展。

目前, 涉及到认知无线网络 MAC 协议综述的主要有: 文献[10]概述了认知无线电频谱管理的研究内容。文献[11]总结了认知无线电自组织网络中 MAC 层的基本功能和设计挑战。文献[12-16]讨论了现有的认知无线网络 MAC 协议。其中, 文献[12]和[13]的内容较为全面。文献[12]分别综述了认知无线电自组织网络和基于基础设施的认知无线网络 MAC 协议。文献[13]从频谱认知, 动态频谱分配, 动态频谱共享, 动态频谱移动性四个方面介绍了现有工作。基于此, 论文综合了最近一段时间新出现的主要研究工作, 从实现成本、控制信道、多信道隐藏终端问题等方面来研究认知无线电自组织网络中的 MAC 协议, 根据接入方式的不同对现有工作重新分类, 并深入探讨了各自的优势和劣势。

本文其余部分的内容安排如下: 首先, 第二节对现有的认知无线电自组织网络 MAC 协议进行归纳分类, 并对一些典型的工作进行详细介绍。其次, 第三节从实现成本、控制信道等多个方面详细对比了现有工作的优势和劣势。然后, 第四节分析探讨了未来可能的研究方向。最后, 第五节对全文进行了总结。

## 2 认知无线电自组织网络 MAC 协议

认知无线电自组织网络的一般模型如图 1 所示。图中五角星和圆形分别表示主用户和次级用户节点。假设认知无线网络由 Q, R, U, S 和 T 五个次级用户组成。由图可见, 主用户网络和认知无线网络在同一个区域内共存。认知无线网络中没有中心控制节点, 由各个次级用户自行建立点到

点的对等通信连接。假设分配给主用户的授权频带被分成  $N$  个数据子信道。次级用户在使用某个数据子信道之前，必须通过信道认知来确定该子信道的可用性。由于周围主用户分布情况的差异，在不同的次级用户看来可被子信道集合可能不相同。显然，次级用户选择数据子信道时除了要避免干扰主用户之外，还要满足图 1 中所示的干扰限制条件。在图 1 中，若两个次级用户之间存在一条连接边，则表示这对次级用户互相在对方的通信覆盖范围，即干扰范围之内，此时他们的通信连接就会受到限制。例如，由于  $U$  与  $Q$  和  $R$  之间都有连接边，所以次级用户  $Q$  和  $R$  不能使用相同的数据信道分别向次级用户  $U$  和  $S$  发送数据。然而，由于  $U$  和  $T$  之间没有连接边，因此  $Q$  和  $T$  可在同一个数据信道上同时分别向  $U$  和  $S$  发送数据<sup>[17]</sup>。

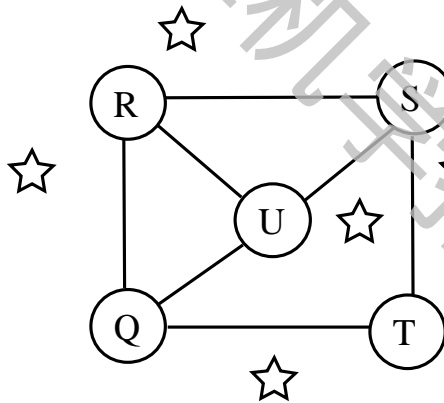


图 1 认知无线电自组织网络的一般模型

现有的认知无线电自组织网络 MAC 协议可分为协商接入和无协商接入 MAC 协议两大类，如图 2 所示。协商接入的 MAC 协议首先使用控制信道完成信道协商，随后访问数据信道。现有大多数工作属于这一类<sup>[17-56]</sup>。其中，文献<sup>[17,20,22,24-28]</sup>使用固定的控制信道，而文献<sup>[18,19,29,34,36,45,46]</sup>则使用动态变化的控制信道。无协商接入 MAC 协议无需事先协商即可尝试访问数据信道。目前只有少数几篇文章属于这一类<sup>[57-63]</sup>。下面分类介绍一批较新的代表性工作。

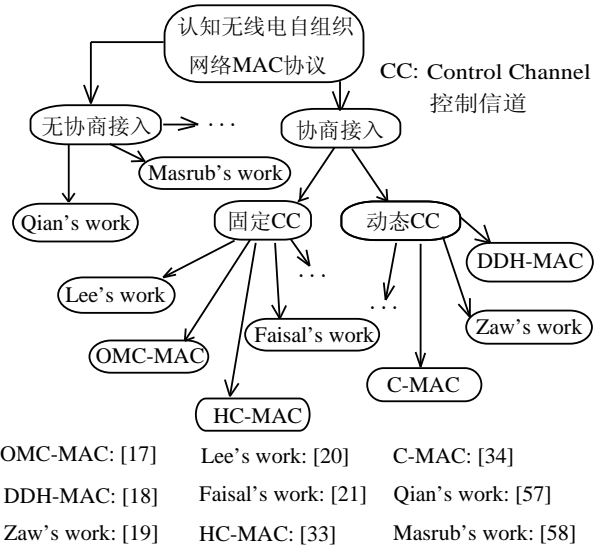


图 2 认知无线电自组织网络现有 MAC 协议分类

### 2.1 协商接入的MAC协议

协商接入的 MAC 协议主要有 Satish C. Jha 等提出的机会多信道 MAC 协议<sup>[17]</sup>，Munam A. Shah 等提出的动态分布式混合 MAC 协议<sup>[18]</sup>以及 Zaw Htike 等提出的具有可靠控制信道的 MAC 协议<sup>[19]</sup>等。这些协议的共同特点是次级用户在正式传输数据之前首先必须在控制信道上完成信道协商过程，以便确定通信目的节点和将要使用的数据信道。

#### 2.1.1 机会多信道MAC协议 (Opportunistic Multi-Channel MAC, OMC-MAC)

Satish C. Jha 等<sup>[17]</sup>提出的 OMC-MAC 协议的定时结构如图 3 所示。OMC-MAC 协议在公共控制信道(Common Control Channel, CCC)上周期性发送信标分组，将时间划分成连续的信标区间(BEACON Interval, BI)。次级用户(Secondary User, SU)加入网络之前首先监听控制信道。如果等待一个 BI 之后还没有收到信标分组，则 SU 认为自己是第一个加入网络的节点，并开始在 CCC 上广播信标分组。每个 BI 又分成认知、竞争和数据传输三个阶段。

在认知阶段，每个 SU 独立扫描所有数据信道，然后根据扫描的结果更新各自的可用信道列表。

在竞争阶段，SU 通过退避算法竞争 CCC 的使用权。胜出的 SU 发送端和接收端将进行请求发送(Request to Send, RTS)、允许发送(Clear to Send, CTS)和确认请求发送(Confirm RTS, CRTS)三次握手，随即完成对某个数据信道的预留。其余 SU 通过侦听 RTS、CTS 和 CRTS 控制分组来更新各自的网络分配向量(Network Allocation Vector, NAV)。已经成功预留一个信道的 SU 就不再预留其他信道，

以保证信道分配具有一定公平性。RTS 中包含了发送端认为可用的信道列表。CTS 中包含了接收端选定的信道编号。RTS 和 CTS 之间的间隔是短帧间空隙 (Short Inter Frame Space, SIFS)。如果发送端发送 RTS 之后又经过了分布式协调功能帧间空隙 (Distributed Coordination Function Inter Frame Space, DIFS) 时间, 仍然没有 SU 往 CCC 上发送 CTS, 则所有 SU 认为 CCC 恢复空闲状态。收到

RTS 之后, 接收端将从收发双方都可以使用的信道中随机选一个, 然后发送 CTS。如果没有这样的信道, 则接收端不再发送 CTS。

在数据传输阶段, 成功预留信道的收发对在预留的信道上完成多个数据分组-确认分组会话。如果未在指定时间内收到确认分组, 发端只能再重发数据分组。

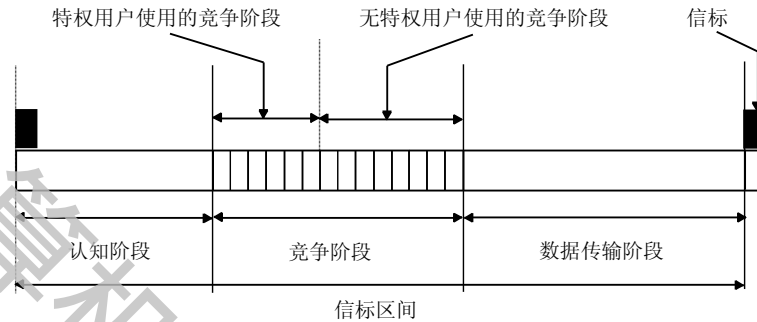


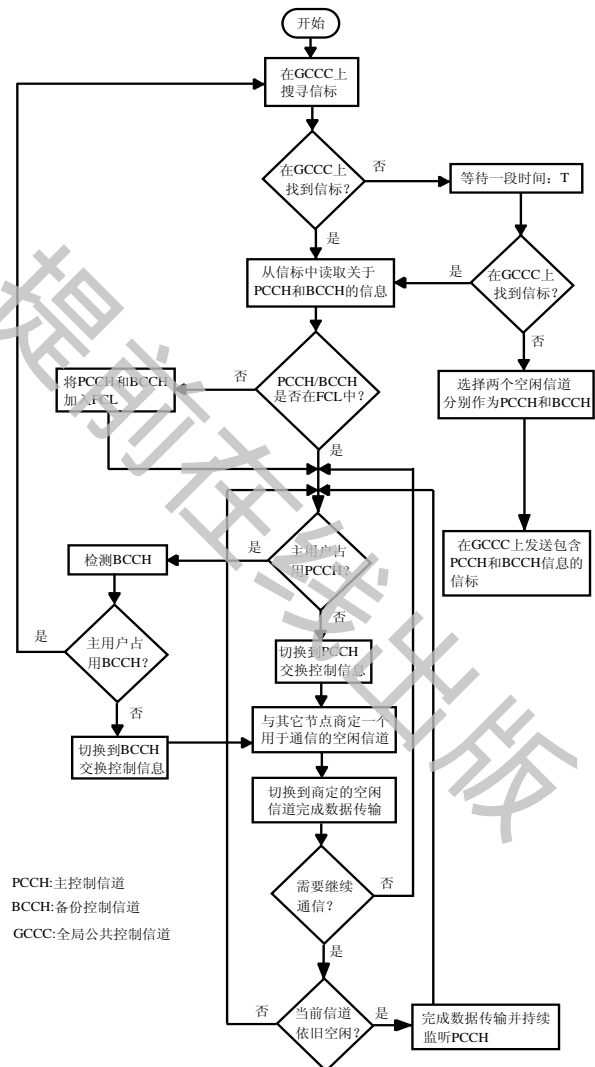
图 3 OMC-MAC 定时结构图

2.1.2 动态分布式混合MAC协议(Dynamic Decentralized Hybrid MAC, DDH-MAC)

文献[18]提出了 DDH-MAC 协议。该协议基于一种控制信道二次选择机制, 并提供了多重网络安全措施。

图 4 为 DDH-MAC 协议的运行流程图。如图所示, 每个认知节点独立扫描所有数据信道, 将所有未被主用户占用的数据信道加入空闲信道列表 (Free Channel List, FCL)。每个认知节点还知道邻居节点的编号, 覆盖范围和能够提供的业务等信息。DDH-MAC 要求每个认知节点拥有两个无线收发机。第一个为全局收发机, 用于在全局公共控制信道(Global Common Control Channel, GCCC)上持续监听信标帧(Beacon Frame, BF)。第二个为数据收发机, 用于收发业务数据。

需要发送数据的认知节点从空闲数据信道中选出主控制信道(Primary Control Channel, PCCH)和备份控制信道(Backup Control Channel, BCCH)。认知节点首先监听 GCCC 一段时间。若 GCCC 空闲, 认知节点就通过在 GCCC 上发送信标帧 BF 来发布 PCCH 和 BCCH 的编号。邻居节点从 GCCC 上收到 BF 之后, 即可确定 PCCH 和 BCCH。随后认知节点在 PCCH 上交换 FCL 等控制消息。若 PCCH 被主用户重新占用, 认知节点就切换到 BCCH 继续传输 FCL。当发送节点与接收节点在 PCCH 或 BCCH 上完成信道协商之后就切换到商定的数据信道上传输业务数据。



PCCH:主控制信道  
BCCH:备份控制信道  
GCCC:全局公共控制信道

图 4 DDH-MAC 协议的运行流程图

除了引入信道访问控制等传统功能之外，DDH-MAC 还特别加入了 4 层安全措施：(1)对 BF 进行加密；(2)FCL 只在本地的 PCCH 上传输，因此只有使用相同 PCCH 的认知节点才能收到 FCL；(3)在数据分组中加入时间戳。接收节点通过检查该时间戳来判断接收到的数据分组的合法性；(4)每完成一次数据会话过程就重新选择 PCCH 和 BCCH。

### 2.1.3 具有可靠控制信道的MAC协议

文献[19]提出了一种能够维持控制信道可靠性的认知无线网络 MAC 协议。作者假设次级用户与主用户共享  $N$  个信道。这  $N$  个信道被分成  $M$  个组  $G_i, i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ，且任意两个组之间没有重叠。在每个信道组中都有且只有一个信道是控制信道  $CC_i \in G_i, i=1, \dots, M$ ，并且每个认知节点都知道这  $M$  个控制信道。

当某个节点需要发送数据时，该节点就选择一个控制信道进行信道认知，若发现有主用户或其他次级用户的活动信号，则切换到另一个控制信道继续认知。当发现一个空闲控制信道时，发送节点在其上发送一个包含接收节点编号的前导帧 (Preamble, PRE)。若没有收到确认帧 (Acknowledgment, ACK)，发送节点就切换到下一个控制信道，并再次发送 PRE。若发送节点在一定时间内收到接收节点发来的 ACK，则收发双方在此控制信道上发起请求发送/确认发送(Request to Send, RTS/Clear to Send, CTS)握手过程。其中，接收节点从空闲数据信道中选出一个信道，将其编号嵌入 CTS 并传给发送节点。收发双方随后切换到 CTS 所指示的数据信道上进行数据传输。在控制信道上的其他认知节点通过监听 RTS/CTS 控制分组获悉数据信道占用情况，从而避免了多个收发对在同一个数据信道上发生冲突。

任意一个暂时无数据可发送的认知节点都对某个控制信道进行监听，以接收可能出现的 PRE。同时，该节点还要对控制信道所在信道组中的数据信道进行周期性的信道认知，以便及时更新空闲信道列表。一旦发现控制信道被主用户占用，认知节点必须切换到下一个控制信道。图 5 显示了文献[19]所提 MAC 协议的信道协商和数据传输过程。

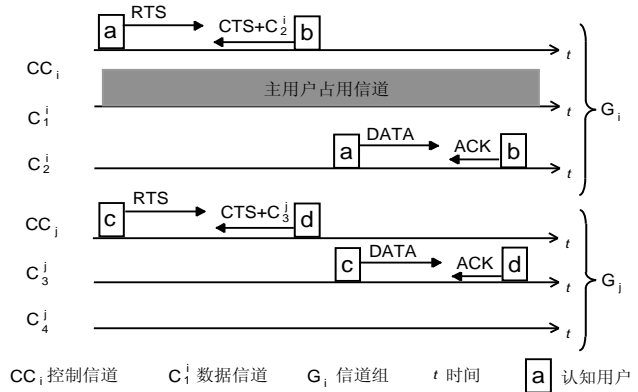


图 5 文献[19]所提 MAC 协议的信道协商与数据传输过程

### 2.1.4 具有动态带宽分配能力的IEEE802.11 认知无线电MAC协议

文献[20]在文献[56]所提单向 MAC 协议的基础上提出了一种增强的双向认知无线电 MAC 协议。改进后的 MAC 协议支持为次级用户动态分配带宽，且能够适应收发节点之间的非对称双向数据流。如图 6 所示，该 MAC 协议将每个会话过程分成两个阶段。

在第一个阶段，发送节点首先决定需要发送  $BD_s$  个数据分组，接收节点也决定将要发送  $BD_r$  个数据分组。 $BD_s$  和  $BD_r$  分别被包含在控制分组 REQcr (request cognitive radio)和 GRANTcr (grant cognitive radio)之中。随后，通信双方进行第一次握手过程 REQcr/GRANTcr。在握手过程中，通信双方约定使用一个共同的数据信道。选择该数据信道的方法即为文献[56]中所提出的智能信道选择法，其基本思想是：总是优先选择空闲概率最高的信道。

在第二阶段，互相通信的两个节点转入前一个阶段预约好的数据信道，并传输多个数据分组。传输每个数据分组之前都要先进行一轮 RTS/CTS 握手。邻居节点监听 RTS/CTS 控制分组并利用其中的会话时间信息来判断正在通信的两个节点还将在该数据信道上工作多久。若两个节点之间存在双向数据流，则在 RTS/CTS 握手之后，发送节点还要再发送一个 RTSe(RTS extended)控制分组。邻居节点收到该控制分组之后会更新次级用户占用信道时间的估计值。完成 RTS/CTS/RTSe 握手之后，通信双方才真正开始传输数据分组。发送节点每收到一个确认分组 ACK 之后，都要发送一个暂停控制分组 SUS(suspend)。之后通信双方就进入一个静默期，以监听主用户信号的活动情况，并据此决定是否继续在当前数据信道上传输数据。

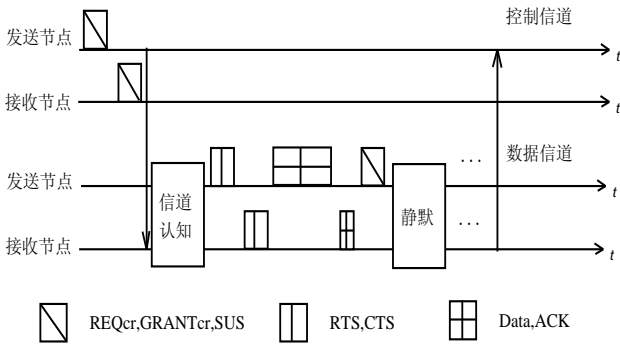


图 6 文献[20]提出的具有动态带宽分配能力的认知无线电 MAC 协议

### 2.1.5 能量高效的多信道认知无线电MAC协议

文献[21]提出一种能量高效的多信道认知无线电 MAC 协议，其主要流程如图 7 所示。该协议使用帧聚合技术和备份信道技术。

帧聚合技术可以减少通信总开销，其基本思想如图 8 所示<sup>[21]</sup>。在同一对发送、接收节点之间进行传输的多个数据帧被合并成一个数据帧进行传输。发送节点根据被聚合的帧的数目来更新帧头中的相关字段。若不使用帧聚合技术，则每个数据帧都会携带物理帧头/尾。这不但增加了传输时间开销，也浪费了能量。

备份信道的存在则使认知节点无需因为主用户返回当前信道而重新进行信道协商，以便保证次级用户通信的持续性。

假设节点 A 首先在专用控制信道(Dedicated Control Channel, DCC)上监听控制分组 ACL (available channel list)。若没有收到任何 ACL，节点 A 就自行在控制信道上发出 ACL。假设节点 B 发现数据信道 1、2 为节点 A、B 所共有。于是节点 B 将信道 1、2 的信息通过 AAACL (acknowledge of available channel list) 控制分组发送给节点 A。若可用信道个数不小于 2，则从中选出两个信道分别作为主数据信道和备份数据信道。当主数据信道空闲时，节点 A 和 B 就使用该信道传输数据。若主用户重新占用主数据信道且备份数据信道空闲，则节点 A 和 B 立即切换到备份数据信道继续传输数据。若两个信道均被主用户占用，则节点 A 和 B 重新发起 ACL/AAACL 握手过程以预留新的数据信道。当节点 A 和 B 完成 ACL/AAACL 信道预留过程之后，其余节点可继续竞争控制信道的访问权。胜出者立即发起新的 ACL/AAACL 信道预留过程。

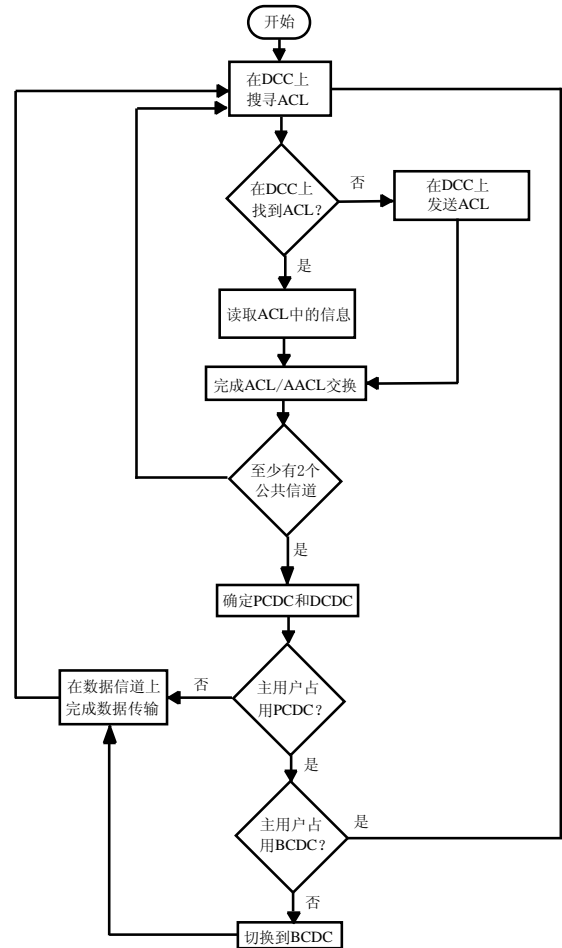


图 7 能量高效多信道认知无线电 MAC 协议流程图

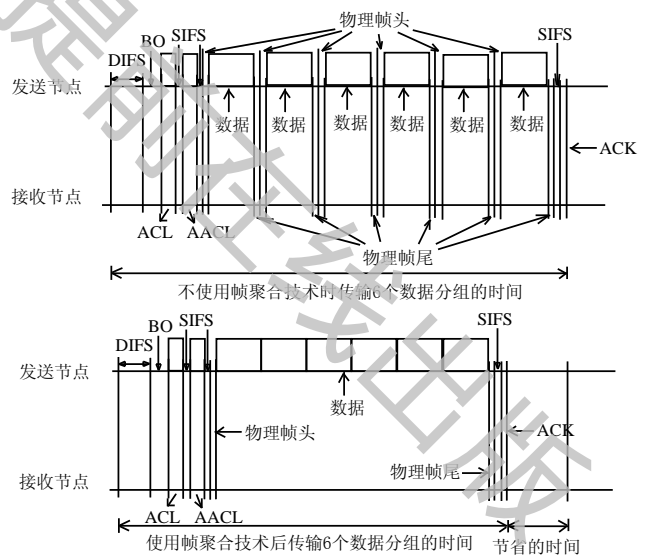


图 8 使用与不使用帧聚合技术的对比

### 2.2 无协商接入的MAC协议

文献[57]提出了两种 MAC 协议，分别称为认知无线电 ALOHA (Cognitive Radio ALOHA, CR-ALOHA)和认知无线电载波侦听多路接入 (Cognitive Radio-Carrier Sensing Multiple Access,

CR-CSMA)协议。

这两种 MAC 协议都基于图 9 所示的帧结构。图中一帧的长度  $T_f < T_v$ ，其中  $T_v$  为次级用户活动信号干扰主用户的最大持续时间。 $T_f$  由认知时间  $T_s$  和数据传输时间  $T_d$  两部分组成，而数据传输时间  $T_d$  又进一步划分成  $M$  个传输时间段(Transmission Period, TP)。

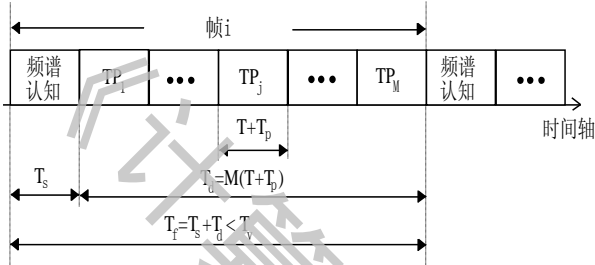


图 9 CR-ALOHA 和 CR-CSMA 两种协议的帧结构

CR-ALOHA 协议的运行规则如下：

(1) 如果次级用户在  $T_s$  结束之时（即完成信道认知之时）发现信道空闲，则在下一个 TP 发送数据分组，前提是该数据分组应该是从上一帧的最后一个 TP 开始到当前帧  $T_s$  结束这段时间内到达 MAC 层的。若该数据分组是当前帧的某个 TP（例如 TP  $j$ ）内到达 MAC 层的，则在下一个 TP（即 TP  $j+1$ ）发送该数据分组。

(2) 如果信道认知结果表明信道繁忙且数据分组缓存队列非空，次级用户会暂停发送数据。当信道重新空闲时，次级用户从退避窗口中随机选择一个 TP 重新发送数据分组。

(3) 如果两个次级用户在信道上发生了冲突，则每个用户都会随机退避若干时间再重新发送数据。

CR-CSMA 的运行过程与 CR-ALOHA 类似，不同之处在于规则(1)。如果次级用户在  $T_s$  结束之时发现信道空闲，则在下一个 TP 发送数据分组，前提是该数据分组应该是从上一帧的最后一个 TP 开始到当前帧  $T_s$  结束这段时间内到达 MAC 层的。若数据分组是当前帧的某个 TP(例如 TP  $j$ )内到达 MAC 层的，则次级用户首先侦听信道一个 TP 时间。若信道空闲，则在下一个 TP 发送该数据分组。否则，继续侦听信道直到信道空闲，随后再次尝试访问信道。

文献[58]提出了一种基于时隙的多信道 MAC 协议，可用于认知无线电自组织网络。假设授权频谱由  $N$  个独立的信道组成。第  $n$  个信道的带宽记做  $B_n$ 。主用户按照同步时隙结构访问这些信道。每个信道在每个时隙中只有两种状态，即被主用户使用或者处于空闲状态。在每个时隙  $t$  开头，需要发送数据的次级用户首先按照下式更新信道空闲概率

$$\lambda_n(t+1) = \lambda_n(t)p^{11} + (1 - \lambda_n(t))p^{01} \quad (1)$$

其中， $\lambda_n(t), \lambda_n(t+1)$  分别表示时隙  $t$  和  $t+1$  内信道  $n$  处于空闲状态的概率， $p^{11}$  和  $p^{01}$  表示信道状态转移概率<sup>[58]</sup>。然后从  $N$  个信道中按照下式选出一个信道  $n^*(t)$

$$n^*(t) = \arg \max_{n=1, \dots, N} [\lambda_n(t)B_n] \quad (2)$$

随后，次级用户检测该信道以了解信道占用情况。若信道未被主用户占用，则次级用户以载波侦听的方式接入该信道并向目标用户发送数据。

### 3 协议比较

除了第二节介绍的代表性工作之外，同类工作还有文献[22-56, 59-63]等。下面从实现成本、控制信道等多个方面对现有工作进行比较，评判各种 MAC 协议的优劣。

#### 3.1 实现成本

文献[32]提出的动态开放频谱共享 MAC (Dynamic Open Spectrum Sharing MAC, DOSS-MAC)协议可以有效缓解认知网络内部的互干扰问题。缺点是需要为忙音信标和控制信道专门开辟频带，占用了较多频带资源。此外，每个节点需要安装三个无线收发机，实现成本较高。

O.Zhao 等<sup>[60][61]</sup>设计了一种基于部分可观察 Markov 决策过程 (Partial Observable Markov Decision Process, POMDP) 理论框架的 MAC 协议。但是 POMDP 所使用的置信向量  $\Lambda(t)$  的维数随信道个数  $N$  指数式增长，所以这种理论上最优的决策过程难以用硬件实现。

文献[33][35]等提出的 MAC 协议只要求每个次级用户安装一个半双工无线收发机，与文献[32][60][61]等相比实现成本较低。但这些协议的控制开销较大。例如文献[33]所提 MAC 协议需要六次握手才能完成一个数据会话。文献[35]所提 MAC 协议中认知节点为了确定自己所在的簇就必须交换与簇相关的信息，这带来了一定的控制信息开销。

#### 3.2 控制信道

文献[20][22][24-29][39-44]等在数据信道之外开辟一个固定的全局控制信道，用于传输 MAC 层控制消息。全局控制信道本身可以是认知网络独占的信道<sup>[40][42][43]</sup>或是多种不同网络所共享的信道

[38]。采用第一种控制信道的优点是稳定可靠,不易受到来自其他系统的干扰。采用第二种控制信道无需获得许可证,因此具有实现成本较低的优点。但由于第二种控制信道上同时存在着多种网络,因此在文献[38]中次级用户在控制信道上受到的干扰相比文献[40][42][43]更加严重。

这些工作的主要缺点是假设网络中有一个全局控制信道,可供网络中所有次级用户访问。但是由于不同地理位置主用户活动存在差异,认知网络中存在一个所有次级用户都可用的控制信道的概率非常小。另外,控制信道也可能会被主用户重新占用,从而导致认知网络通信中断。

采用动态控制信道机制的一些文献(如文献[18][45][46]等)在应对上述问题时相比文献[24-29][39-44]等更有优势。文献[45]提出的同步MAC协议(Synchronized MAC SYN-MAC)根据主用户活动预测模型选择跳频序列。所有次级用户根据此跳频序列同步完成信道跳跃。Chao-fong Shih等<sup>[46]</sup>提出的动态信道跳跃MAC(Dynamic Channel Hopping MAC, DH-MAC)协议则规定每个节点都有一个唯一的跳频序列。当一个发射节点准备和一个接收节点通信时,就同步到该接收节点所使用的跳频序列上。这样,收发双方就总是能在同一个信道上完成握手和数据传输过程。文献[18]所提DDH-MAC使用备份信道来解决主用户重返控制信道造成认知网络通信中断的问题。另外,它还采用本地控制信道来解决认知无线网络缺乏全局控制信道的问题。

SYN-MAC等协议的优势是可以减少由于主用户重返控制信道导致的认知网络通信中断。但是这类协议要求整个网络中的次级用户都达到时间同步,这在多跳自组织网络中很难实现。相比之下,DDH-MAC对同步要求不高,且能减少认知网络通信中断的概率,因此更适合于多跳网络。DDH-MAC相比SYN-MAC等工作的劣势在于它将很多数据信道用作本地控制信道或备份信道,这减少了可用于数据传输的频率带宽,不利于提高频谱利用效率。

### 3.3 多信道隐藏终端问题

考虑到认知无线电动态调整工作频率的能力,认知无线网络往往运行在多信道环境之中。由于缺乏关于信道被占用状况的全局信息,多个次级用户可能同时切换到同一个信道上,从而引起所谓的多信道隐藏终端问题。文献[44]提出一种基于认知无线电的多信道MAC协议(Cognitive Radio-EnAbl

ed Multi-Channel MAC, CREAM-MAC)。CREAM-MAC要求每个次级用户同时拥有控制收发机和数据收发机。控制收发机一直工作在控制信道上,通过监听其他次级用户发出的控制分组来获取所有数据信道被其他次级用户占用的情况。因为文献[44]假设在控制信道上任何次级用户发出的分组均可被其他所有次级用户收到,所以CREAM-MAC就解决了多信道隐藏终端问题。与CREAM-MAC类似,文献[40]等所提的MAC协议也采用持续监听控制信道的办法来避免此问题。

文献[18]提出的DDH-MAC协议也需要监听控制信道才能解决多信道隐藏终端问题。但和文献[40][44]不同,DDH-MAC所使用的控制信道并非全局控制信道,而是从多个信道中选出的本地控制信道。因此DDH-MAC更能适应认知无线电自组织网络的实际情况。另外,DDH-MAC将次级用户分为多个用户组,不同用户组使用的信道集合之间没有交集。属于不同用户组的用户不可能访问相同的信道,因此有助于减少多信道隐藏终端问题。不过由于DDH-MAC采取多控制信道方案,与[40]和[44]等工作相比,DDH-MAC增加了用于控制信道切换的时间开销。

### 3.4 固定信道划分问题

现有文献大多将频谱固定划分成多个信道(例如[17-31]),并以机会频谱接入的方式动态访问一个或多个信道。在这种固定信道划分方法之下,即使一个数据信道只被主用户部分占用,次级用户也无法访问该信道。与文献[17-31]等不同,文献[32]提出的DOSS-MAC协议根据频谱认知的结果动态决定数据信道的中心频率和带宽,可将邻近的多个数据信道组合成一个宽带信道使用。另外,DOSS-MAC还支持同时使用多个频率不连续的数据信道。因此,DOSS-MAC的数据信道划分方法更灵活,进一步提高了频谱利用效率。DOSS-MAC的局限在于每次确定数据信道之前都需要快速扫描整个频段以找出空闲频谱,同时要求认知无线电收发机可以任意调整发射信号的中心频率和带宽,这些要求都增加了硬件实现的难度与成本。

### 3.5 业务质量保障/业务优先级问题

文献[40][42][44]等通过限制次级用户访问时间,提高频谱认知准确性,周期性检测主用户活动信号等方法限制次级用户对主用户的干扰,从而保证主用户的业务质量等级。但这些工作都没



有考虑次级用户的业务质量。

与文献[40]等不同，文献[39]等对次级用户提供了某种形式的业务质量差异化服务。文献[39]提出的多跳多信道 MAC(Multi-hop Multi-channel MAC, MMAC)使用载波侦听多路接入/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA)的方式发送控制/数据分组，且具有两种退避窗长度，分别对应这两种类型的分组。文献[38]提出的支持 QoS 的 MAC 协议则根据不同类型的业务使用不同长度的退避窗口。文献[39]和[38]从不同的角度提供了某种差异化服务，因此在特定的场景下各有用途。它们的共同缺点是仅仅针对退避窗口长度提供了差异化服务，在功能上比较单一。

综上所述，表 1 比较了现有的各种认知无线电自组织网络 MAC 协议的基本特征。从表 1 的第 2 列可见，多数文献所提 MAC 协议采用了基于协商的接入机制。但表 1 的第 3 列也说明有一些基于协商接入的 MAC 协议并不需要专用控制信道，亦即

协商过程并不一定依赖于专用控制信道。从表 1 的第 4 列可以看出大多数工作都假设每个认知节点装有 1~2 个收发机。采用 2 个收发机的工作一般认为数据收发机和控制收发机可同时工作，实现成本虽高但容易解决多信道隐藏终端问题。而采用 1 个收发机的工作一般需要在控制信道和数据信道间频繁切换，带来额外的切换时间开销，其优点是实现成本较低。第 5 列表明只有文献[32]不采用固定划分的数据信道。因此，文献[32]所提 MAC 协议在信道使用灵活性和频谱利用高效性上较其它工作有很大优势。从第 6 列可以看出，需要严格时间同步的工作只有文献[34]。其它文献或者无需时间同步，或者将异步操作与同步操作结合使用。对时间同步要求不高的 MAC 协议更容易实现，因此得到的关注也较多。

表 1 各种认知无线电自组织网络 MAC 协议主要特征比较

参考文献	类型	是否使用专用控制信道	收发机个数	信道频率范围是否固定	是否需要时间同步
[32]	协商接入	是	3	否	否
[33]	协商接入	是	1	是	否
[38]	协商接入	是	1	是	否
[34]	协商接入	否	1	是	是
[17]	协商接入	是	1	是	部分
[35]	协商接入	是	1	是	部分
[45]	协商接入	否	2	是	部分
[39]	协商接入	是	2	是	部分
[60,61]	协商接入	否	1	是	部分
[40]	协商接入	是	1	是	部分
[57]	无协商接入	否	1	是	是

#### 4 未来的研究方向

现有工作大多没有讨论所谓的暴露主发射机和隐藏主接收机问题。若主用户发射节点位于认知发射节点附近，但主用户接收节点不在认知发射节点干扰范围之内，则容易引发暴露主发射机问题，从而浪费可用传输机会。若主用户接收节点位于认知发射节点的干扰范围内，但主用户发射机在认知发射节点的检测范围之外，则容易引发隐藏主接收机

问题，从而增加主用户受到的干扰。这两个问题都是由于认知节点对频谱可用性信息的理解不完整而造成的。通过传统的握手机制可以解决次级用户的隐藏终端和暴露终端问题<sup>[61]</sup>。但如何解决暴露主发射机和隐藏主接收机问题还有待进一步研究。

为了抵抗随机衰落信道对频谱认知精度的影响，现有工作往往采用一些合作频谱认知技术（例如文献[36][39][40]）。但目前的认知无线网络 MAC 协议在使用合作频谱认知技术时，大多都假设不同节点的频谱认知结果互相独立。在合作频谱认

知中,如果节点之间具有空间相关性,则为了达到同样的认知性能,需要更多的节点参与合作。未来的认知无线网络 MAC 协议需要考虑空间相关性,使用更加有效的合作频谱认知技术。

尽管目前已有不少文献对认知无线网络的资源优化分配算法进行了研究<sup>[65-67]</sup>,但是能够有效整合这些分配算法的认知无线电自组织网络 MAC 协议并不多。文献[22]的作者提出了一种受资源分配优化算法驱动的 MAC 协议框架,且该资源优化算法基于纳什博弈模型。但文献[22]仅讨论了大致的协议框架,并没有给出资源优化算法的细节。文献[47]将基于博弈论的功率控制算法引入传统自组织无线网络 MAC 协议,但这个方案无法直接应用于认知无线网络。如何将资源优化分配算法引入认知无线电自组织网络 MAC 协议以同时提高次级用户和主用户的频谱使用效率还有待深入研究。

现有工作(如文献[40])往往要求次级用户在数据收发机的基础上再额外提供一个控制收发机,这增加了设备实现成本与复杂度。文献[33-35]等虽然只要求每个次级用户安装一个收发机,但是控制信令交换和数据传输不能同时进行,从而降低了频谱使用效率。如何兼顾设备实现成本和频谱使用效率仍然是未来值得研究的问题。

现有工作一般以提高频谱使用效率为主要目标,很少关注设备功耗问题。在某些能量受限的场合下,设备功耗也是衡量系统性能的重要指标之一。因此,在提高吞吐量,减少干扰的同时,也应当研究如何减少功率消耗以延长设备续航时间。

最后,认知无线电虽说可以提高频谱的使用效率,但从理论根基上来说,MAC 层的吞吐量才是衡量其性能的重要指标。因此,认知无线电自组织网络 MAC 协议的吞吐量研究及其所带来的认知容量增益的研究也将是未来的一个研究热点。

## 5 小结

本文首先介绍了认知无线电的基本思想,建立了认知无线电自组织网络 MAC 协议的基本概念。其次按照接入机制的不同对现有的工作进行分类,并详细介绍了一些最新的代表性工作。最后深入比较了现有认知无线电自组织网络 MAC 协议的优缺点,并简要讨论了该领域未来的研究方向。

在现有的静态频谱分配政策下,已分配频段的频谱使用效率低下。认知无线电自组织网络将传统

自组织网络和认知无线电技术相结合,极大地提高了频谱使用效率,同时又具有部署灵活,生存能力强等优势。但这种网络架构也给 MAC 层的设计带来了很大挑战,在接入协调机制,控制信道维护,主用户业务质量保护等方面还有很多有待解决的问题。因此,认知无线电自组织网络 MAC 协议设计仍然是一个开放领域。

尽管如此,现有的工作已经在协议的吞吐量,接入延迟,可靠性等方面有了很多进展。相信这个领域将吸引学术界和工业界的持续关注,并在未来几年里不断走向成熟。

## 参考文献

- [1] Yuan Yuan et al. KNOWS: cognitive radio networks over white spaces//Proceedings of the IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Dublin, Ireland, 2007:416-427
- [2] Mitola J., Maguire G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Personal Communications. 1999, 6(4): 13-18
- [3] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005, 23(2): 201-220
- [4] Definitions of software defined radio (SDR) and cognitive radio systems (CRS), SM.2152(2009), <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2152>
- [5] E. Peh, Y. C. Liang. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Hong Kong, China, 2007: 27-32
- [6] T. Yucek, H. Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130
- [7] W. A. Gardner. Signal interception: a unifying theoretical framework for feature detection. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(8): 897-906
- [8] Yonghong Zeng, Yingchang Liang. Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(6): 1784-1793
- [9] Nikhil Kundargi, Ahmed Tewfik. ProTOMAC: proactive transmit opportunity detection at the MAC layer for cognitive radios//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa, 2010: 1-5
- [10] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. IEEE Communications Magazine. 2008, 46(4): 40-48
- [11] I. F. Akyildiz et al. CRAHNS: cognitive radio ad hoc networks. Ad Hoc Networks Journal. 2009, 7(5): 810-836
- [12] Claudia Cormio et al. A survey on MAC protocols for cognitive radio

- networks. *Ad Hoc Networks*. 2009, 2009(7): 1315-1329
- [13] A. De Domenico, E.C. Strinati et al. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2012, 14(1): 21-44
- [14] A. K. L. Yau, P. Komisarczuk et al. On multi-channel MAC protocols in cognitive radio networks//*Proceedings of Telecommunication Networks and Applications Conference*. Adelaide, Australasian, 2008: 300-305
- [15] H. Wang et al. A survey on MAC protocols for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks//*Proceedings of International Conference on Computer Science and Software Engineering*. Wuhan, China, 2008: 214-218
- [16] T. V. Krishna, A. Das. A survey on MAC protocols in OSA networks. *Computer Networks Journal*. 2009, 53(9): 1377-1394
- [17] Satish C. Jha, Umesh Phalval et al. Design of OMC-MAC: an opportunistic multi-channel MAC with QoS provisioning for distributed cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(10): 3414-3425
- [18] Munam A. Shah et al. DDH-MAC : a novel dynamic de-centralized hybrid MAC protocol for cognitive radio networks//*Proceedings of Roedunet International Conference 2011*. Luton, UK, 2011: 1-6
- [19] Zaw Htike et al. A MAC protocol for cognitive radio networks with reliable control channels assignment//*Proceedings of 2012 International conference on information networking*. Bali, Indonesia, 2012: 81-85
- [20] Lee-Chin Lau et al. An IEEE 802.11 cognitive radio MAC protocol with dynamic bandwidth allocation capabilities//*Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Shanghai, China, 2012: 1422-1426
- [21] Faisal Fayyaz Qureshi. Energy Efficient Cognitive Radio MAC Protocol for Adhoc Networks//*Wireless Telecommunication Symposium*. London, UK, 2012: 1-5.
- [22] C. Zou, C. Chigan. A game theoretic DSA-driven MAC framework for cognitive radio networks//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Beijing, China, 2008: 4165-4169
- [23] Le Thanh Tan and Long Bao Le. Channel assignment for Throughput Maximization in Cognitive Radio Networks//*Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Shanghai, China, 2012: 1427-1431.
- [24] Wha Sook Jeon et al. A novel MAC scheme for multichannel cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2012, 11(6): 922-934
- [25] Sonia Fourati et al. RMC-MAC: a reactive multi-channel MAC protocol for opportunistic spectrum access//*Proceedings of 2011 4<sup>th</sup> IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security*. Paris, France, 2011:1-5
- [26] Le Thanh Tan et al. Distributed MAC protocol for cognitive radio networks: design, analysis, and optimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011, 60(8): 3990-4003
- [27] Wong, D.T.C. et al. Cognitive multi-channel MAC protocols with perfect and imperfect sensing//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Kyoto, Japan, 2011: 1-5
- [28] Yun Li et al. A distributed cooperative MAC for cognitive radio ad-hoc networks//*Proceedings of 2011 IEEE Symposium on Computers and Communications*. Kerkyra, Greece. 2011: 1038-1043
- [29] Yun Li et al. A MAC protocol supporting dynamic control channel for cognitive radio ad hoc networks//*Proceedings of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control*. Hangzhou, China. 2011: 37-40
- [30] Mishra, V. et al. MAC protocol for two level QoS support in cognitive radio network//*Proceedings of 2011 International Symposium on Electronic System Design*. Kochi, Kerala, 2011: 296-301
- [31] Masrub, A. et al. Cognitive radio based MAC protocol for wireless ad hoc networks//*Proceedings of Developments in E-Systems Engineering*. Dubai, 2011: 465-469
- [32] Liangping Ma, Xiaofeng Han, Chienchung Shen. Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks //*Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, USA, 2005: 203-213
- [33] J. Jia, Q. Zhang, X. Shen. HC-MAC: a hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 106-117
- [34] C. Cordeiro, K. Challapali. C-MAC: a cognitive MAC protocol for multichannel wireless networks//*Proceedings of the IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks*. Dublin, Ireland, 2007:147-157
- [35] B. Hamdaoui, K. G. Shin. OS-MAC: an efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(8): 915-930
- [36] Dongyue Xue, Eylem Ekici, Xinbing Wang. Opportunistic periodic MAC protocol for cognitive radio networks//*Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*. Miami, USA, 2010: 1-6
- [37] Beycan Kahraman, Fera Buzluca. Protection and fairness oriented cognitive radio MAC protocol for ad hoc networks//*Proceedings of 2010 European Wireless Conference*. Lucca, Italy, 2010: 282-287
- [38] Lin X. Cai, Yongkang Liu et al. Distributed QoS-aware MAC for multimedia over cognitive radio networks//*Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*. Miami, USA, 2010: 1-5
- [39] M. Timmers et al. A distributed multichannel MAC protocol for multihop cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(1): 446-459
- [40] Su Hang, Zhang Xi. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisioning over cognitive radio wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 118-129
- [41] H. A. B. Salameh et al. MAC protocol for opportunistic cognitive radio networks with soft guarantees. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(10): 1339-1352
- [42] Alex Chia-chun Hsu et al. A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks//*Proceedings of IEEE*

- Wireless Communications and Networking Conference. Hong Kong, China, 2007: 105-110
- [43] Singh S.R., De Silva B, Tie Luo, Motani M. Dynamic spectrum cognitive MAC (DySCO-MAC) for wireless mesh & ad hoc networks//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications. San Diego, USA, 2010: 1-6
- [44] Xi Zhang, Hang Su. CREAM-MAC: cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol over dynamic spectrum access networks. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 110-123
- [45] Y. R. Kondareddy et al. Synchronized MAC protocol for multihop cognitive radio networks//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Beijing, China, 2008: 3198-3202
- [46] Chao-fong Shih et al. DH-MAC: a dynamic channel hopping MAC protocols for cognitive radio networks//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa, 2010: 1-5
- [47] F. Wang et al. GMAC: a game-theoretic MAC protocol for mobile ad hoc networks//Proceedings of Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Boston, USA, 2006: 1-9
- [48] T. Chen et al. Cogmesh: a cluster-based cognitive radio network//Proceedings of Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Dublin, Ireland, 2007: 168-178
- [49] Seung Hwan Lee, Byung Joo Lee and Seung Hyong Rhee. An adaptive MAC protocol for efficient utilization of available spectrum bandwidth//International conference on ubiquitous and future networks (ICUFN). Dalian, China, 2011: 369-370
- [50] Salman Khan, Ali Nawaz Khan and Saleem Akhtar. Multichannel cognitive MAC protocol for efficient utilization of wireless spectrum//International conference on communications and mobile computing (CMC). Qingdao, China, 2011: 286-289
- [51] Gao Ren and Wang Hui. A parallel rendezvous multi-channel MAC protocol for distributed cognitive radio networks//International conference on internet technology and applications (iTAP). Wuhan, China, 2011: 1-4
- [52] Gyanendra Prasad Joshi and Sung Won Kim. An enhanced synchronized MAC protocol for cognitive radio networks//International conference on wireless communications, networking and mobile computing (WiCOM). Wuhan, China, 2011: 1-4
- [53] Lee-Chin Lau, Chih-Che Lin and Shie-Yuan Wang. Bi-directional cognitive radio MAC protocol for supporting TCP flows//IEEE Vehicular technology conference (VTC Fall). San Francisco, CA, USA, 2011: 1-5
- [54] Yichen Wang, Pinyi Ren, Qinghe Du and Chao Zhang. A channel-aggregation diversity based MAC protocol in power-constrained cognitive ad hoc networks//IEEE Global telecommunications conference (GLOBECOM). Houston, TX, USA, 2011: 1-6
- [55] Zhifeng He, Jianyan He and Yinghe Wang. An MAC protocol enabling fast rendezvous for secondary users in cognitive networks based on two-stage sensing//IEEE international symposium on microwave, antenna, propagation and EMC technologies for wireless communications (MAPE). Beijing, China, 2011: 717-721
- [56] Shie-Yuan Wang, Yu-Ming Huang, Lee-Chin Lau and Chih-Che Lin. Enhanced MAC protocol for cognitive radios over IEEE 802.11 networks//IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC). Cancun, Quintana Roo, Mexico, 2011: 37-42
- [57] Qian Chen, Yingchang Liang et al. A two-level MAC protocol strategy for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2164-2180
- [58] A. Masrub and H. Al-Raweshidy. Time Slotted Based Cognitive MAC Protocols for Multi-Channel Wireless ad hoc Networks//Proceedings of Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Limassol, Cyprus, 2012: 366-370.
- [59] Chunsheng Xin, Min Song et al. Control-free dynamic spectrum access for cognitive radio networks//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa, 2010: 1-5
- [60] Q. Zhao, L. Tong et al. Decentralized cognitive MAC for dynamic spectrum access//Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, USA, 2005: 224-232
- [61] Q. Zhao, L. Tong et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3): 589-600
- [62] S. Huang et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks//Proceedings of IEEE INFOCOM. Phoenix, AZ, USA, 2008: 1427-1435
- [63] Yi-Nan Xu, Ming-Kui Li and Yihu Xu. Design and implementation of a hardware-constrained cognitive radio MAC protocol//International conference on Advanced communication technology (ICACT). Seoul, Korea, 2011: 712-715
- [64] C. M. Cordeiro, K. Challapali et al. IEEE 802.22: an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios. Journal on Communications, 2006, 1(1): 328-337
- [65] H. Zheng, C. Peng. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Seoul, Korea, 2005: 3132-3136
- [66] F. Wang et al. GMAC: a game-theoretic MAC protocol for mobile ad hoc networks//Proceedings of Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Boston, USA, 2006: 1-9
- [67] B. Atakan, O. B. Akan. BIOlogically-inspired spectrum sharing in cognitive radio networks//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon, China, 2007: 43-48



**LUO Tao**, born in 1971, Ph. D., Professor. His research interests include mobile communication, cognitive radio networks and WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment).

**ZHAO Ming**, born in 1984, Ph. D. student. His research interests include cognitive radio networks and dynamic spectrum management.

**LI Jing-Ye**, born in 1984, Ph. D. student. Her research interests include cognitive radio networks and mobile communication.

**YUE Guang-Xin**, born in 1937, Professor. His research interests include digital communication and signal processing theories, wireless communication.

**WANG Xiao-Jun**, born in 1961, Ph. D., Senior Lecturer. His research interests include energy efficient hardware acceleration for network security applications, QoS provisioning and resource optimization in heterogeneous networks.

## Background

Dynamic spectrum allocation policy with the cognitive radio (CR) technology is an effective approach to solve the spectrum scarcity problem and inefficient spectrum utilization problem. Medium access control (MAC) protocols play an important role in the ad hoc CR wireless networks in terms of deciding on the sensing times, determining spectrum opportunities and coordinating the spectrum access behaviors of secondary users. Compared with the MAC protocols for classical ad hoc wireless networks, the main challenge of MAC protocols in the CR context is that the protocols have to guarantee the primary users' quality of service while improving the throughput performance of secondary users. Moreover, because of the lack of central control point, the spectrum access coordination problem is more challenging in ad hoc networks compared with their infrastructure-based counterparts.

This paper gives a comprehensive survey on the recent

research progresses in the field of MAC protocols for ad hoc CR networks. We classify the existing works into two groups, namely negotiated access-based protocols and non-negotiated access-based protocols. A detailed description on the typical MAC protocols for ad hoc CR networks is given according to this classification. What's more, the pros and cons of the existing works in this field are presented in this survey.

This work is supported in part by program for National Natural Science Foundation of China under Grant No.62171184; National Key Basic Research Program of China (973 Program) under Grant No. 2009CB320400; New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0594); Open Fund of the State Key Laboratory of Integrated Services Networks (No. ISN12-03).