

# 非饱和和认知无线电网络 MAC 协议设计

谢小可<sup>1</sup>,唐菁敏<sup>2</sup>,李静叶<sup>3</sup>,蔡 冉<sup>3</sup>,赵 明<sup>3</sup>

(1. 北京邮电大学服务科学研究中心,北京 100876;2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院,云南昆明 650500;  
3. 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 100876)

**摘 要:** 针对具有连续性接入需求的业务,论文融合时分多址接入技术和竞争窗口差分服务机制,提出了具有连续性保障的无线接入协议:CP-MAC (MAC with Continuity Provisioning)协议.通过对业务等级划分,保障了连续用户的接入概率.并基于 Markov 模型,给出了非饱和和认知无线电网络的系统容量,接入时延和被阻塞概率的数学解析式.最后,通过与现存的 MAC 接入协议比较,CP-MAC 协议在不降低系统容量的同时,提高了连续用户的接入概率,并降低了其接入时延.

**关键词:** 认知无线电;非饱和网络;MAC;连续性

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 06-1140-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.015

## Design of MAC Scheme in Unsaturated Cognitive Radio Networks

XIE Xiao-ke<sup>1</sup>, TANG Jing-min<sup>2</sup>, LI Jing-ye<sup>3</sup>, CAI Ran<sup>3</sup>, ZHAO Ming<sup>3</sup>

(1. Service Science Research Center Laboratory of Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

3. The Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence of Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** This paper proposes a new media access control protocol with continuity provisioning (CP-MAC) by converging time division multiple access and contention window differential service mechanism for the continuous services. The continuous access probability would be guaranteed by a priority method. We give the mathematical framework by Markov chain model in terms of the system capacity, latency and the blocked gain of the general users in unsaturated networks. Compared with the current protocols, CP-MAC can access the network with a higher probability and lower latency while there is no any system capacity loss for the continuous users.

**Key words:** cognitive radio (CR);unsaturated networks;media access control (MAC);continuity

## 1 引言

根据 IEEE 802.22 标准制定小组的工作进展,CR-MAC 传输机制仍是一个热点研究课题<sup>[1]</sup>.为了避免对授权用户带来干扰,认知用户需要周期性的频谱检测和频谱切换<sup>[2,3]</sup>.而频谱检测和链路重建会中断认知用户的业务,因此,研究具有保障认知用户业务连续传输功能的接入协议很有价值.

在分布式认知无线网络中,MAC 协议主要基于 BI(Beacon Interval)结构<sup>[4,6~9]</sup>.联合考虑终端的设备成本和控制信道的稳定性<sup>[5]</sup>,基于单天线、带外控制信道、SP(Split Phase)模式的多信道 MAC 接入协议设计颇受青睐.该方案中,认知用户首先进行频谱检测,然后接入控制信道—交互控制信息、预留频谱资源,最后在预留的频谱资源上传输数据.

在接入控制信道的过程中,多数文献直接采用了 Ad Hoc 网络接入协议:CSMA/CA 协议<sup>[7,10]</sup>和 S-ALOHA<sup>[8~10]</sup>,这些协议能够保证接入的公平性,但考虑到持续时间长的业务需求(论文中指需要连续占用多个帧的业务),该协议并不能提供任何接入保障措施.文献[11]、[12]将该问题归类于 QoS 问题,利用优先级原理,区别对待不同等级的业务.Satish 融合了高优先级业务时隙划分与竞争窗口差分服务机制(IEEE 802.11e 的 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access)协议<sup>[13]</sup>),分析了饱和网络的系统性能<sup>[11]</sup>.

综上,关于业务的连续性接入保障机制鲜有研究,尤其在非饱和网络中.论文基于前期工作—文献[12]的无线接入协议,采用局部优化手段,优化连续用户(论文中把在相邻的帧之间持续有发送需求的用户叫做连续用户)的接入概率,具体描述为

(1)提出 TDMA 与 DCF 相结合的时隙划分准则:连续用户直接接入,首发用户(前一帧为空闲,当前帧有发送需求的用户叫做首发用户)先检测再接入,这种方式降低了首发用户对连续用户的接入干扰;

(2)在每一个时隙设置长度为  $\tau$  的冗余时间用于检测,以实现同步传输与用户级别的划分;

(3)利用一维 Markov 链模型,给出了系统容量,接入时延和被阻塞概率的数学解析式。

## 2 系统模型

$U$  个认知用户自组织为一个 Ad Hoc 网络,每个用户具有一对收发器,采用半双工机制通信.公共控制信道为专用的带外授权信道,该控制信道不会受到授权用户的干扰.并不是所有的认知用户在任何时刻都有发送需求,任何用户在任意帧时间内产生业务需求的概率为  $p_0$ .

### 2.1 CP-MAC 协议工作原理

时间帧采用基于 SP 的划分方法,如图 1 所示,整个时间帧分为检测( $T_S$ ),竞争( $T_C$ )和数据传输( $T_D$ )三个时期,时间帧长度为  $T_f = T_S + T_C + T_D$ .认知用户首先在检测时期获得空闲频谱,然后在竞争时期接入公共控制信道—交互控制信息、预留频谱资源,最后在数据传输时期,在预留的频谱资源上传输数据。

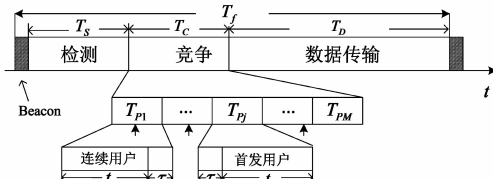


图1 CP-MAC时间帧结构

竞争时期被划分为  $M$  个时隙,时隙长度为  $T_{\text{slot}} = \tau + t_p$ ,其中  $t_p = t_{\text{RTS}} + t_{\text{SIFS}} + t_{\text{CTS}} + t_{\text{SIFS}}$  可以完成一次完整的控制信息交互过程.以 S-D 链路为例,当 S 获得信道接入机会之后,广播 RTS 信息,该 RTS 信息包含了 S 检测到的空闲频谱列表,目的端 ID,调制方式等参数.D 收到 RTS 信息后,判断并预留资源(文献[12.(1)]),在  $t_{\text{SIFS}}$  之后广播 CTS 信息.S 收到 CTS 信息之后,在等待时间  $t_{\text{SIFS}}$  后(用于 S 和 D 调节射频参数等),开始传输数据.其他的用户则监听该 CTS 信息并更新其网络分配矢量表以避免同频干扰.分别描述两种用户的接入过程。

### 2.2 连续用户

连续用户(S)首先产生随机等待时钟,当等待时钟减为 0 的时候,在下一个时隙的开始广播 RTS 信息.该过程中会出现以下三种情况:

(1)D 没有收到 RTS 信息,则 D 继续监听,S 产生退

避时钟;

(2)D 收到 RTS 信息,等待  $t_{\text{SIFS}}$  时间后,广播 CTS 信息,并调整 RF 到数据信道,准备数据接收;而 S 没有收到 CTS 信息,则 S 产生退避时钟.D 在  $\tau$  时期不会接收到任何数据,将在下一个时隙的开始重新调整到监听控制信道状态;

(3)D 收到 RTS 信息,S 收到 CTS 信息,则 S 在  $\tau$  时刻发送数据,D 准备接收数据。

如果认知用户在该时期内没有成功建立链路,则退避到下一个帧,重复上述过程。

### 2.3 首发用户

不同于连续用户,首发用户的退避时钟为 0 时,不会直接接入控制信道,而是先监听,监听时间为  $\tau$ .如果监听结果为空闲,则在  $\tau$  结束时广播 RTS 请求信息;如果监听结果为忙,则以概率  $P$  持续监听下一个时隙,以概率  $1 - P$  退避.因此,该过程中出现的情况与连续用户相同,只是事件发生时刻向后推移  $\tau$ .如果首发用户在该时期内没有成功完成信道接入,则退避到下一帧,重复上述过程。

## 3 数学模型

根据 CP-MAC 工作原理,假设连续用户在一个帧的成功接入概率为  $P_s^h$ ,首发用户的成功接入概率为  $P_s^l$ ,则其失败接入概率分别为  $P_f^h = 1 - P_s^h$  和  $P_f^l = 1 - P_s^l$ 。

### 3.1 用户状态分布

认知用户存在以下三种状态:连续性发送状态,首次发送状态,空闲状态,分别用  $H, L, D$  表示.以时间帧为单位,其状态转移图如图 2 所示。

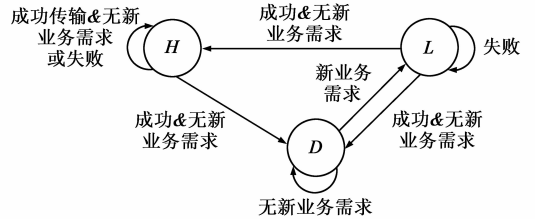


图2 用户状态转移图

各状态的一阶转移概率描述如下:

$$\Pr(H|H) = P_f^h + P_s^h p_0; \quad \Pr(D|H) = P_s^h(1 - p_0);$$

$$\Pr(D|D) = 1 - p_0; \quad \Pr(L|D) = p_0;$$

$$\Pr(H|L) = P_s^l p_0; \quad \Pr(L|L) = P_f^l;$$

$$\Pr(D|L) = P_s^l(1 - p_0).$$

图 2 是有限状态的联通图,令三个状态的稳态概率分别为  $\pi_h, \pi_l$  和  $\pi_d$ .建立稳态方程为

$$\pi_h (P_f^h + P_s^h p_0) + \pi_l (P_f^l + P_s^l p_0) = \pi_h \quad (1)$$

$$\pi_d p_0 = \pi_l \quad (2)$$

$$\pi_h + \pi_l + \pi_d = 1 \quad (3)$$

得到

$$[\pi_h, \pi_l, \pi_d] = \frac{\left[ \frac{P_s^l p_0}{P_s^h(1-p_0)}, 1, \frac{1-P_f^l}{p_0} \right]}{\frac{P_s^l p_0}{P_s^h(1-p_0)} + 1 + \frac{1-P_f^l}{p_0}} \quad (4)$$

则连续用户, 首发用户和空闲用户的个数分别为  $U_h = U\pi_h$ ,  $U_l = U\pi_l$  和  $U_d = U\pi_d$ .

### 3.2 接入概率

连续用户的接入不会受到首发用户的干扰, 其接入与退避状态可以用 Bianchi 提出的两状态 Markov 模型进行建模, 因此其接入概率  $\alpha$  为<sup>[14]</sup>

$$\alpha = \frac{2(1-2P_{ci}^h)(1-P_{ci}^h)}{(1-2P_{ci}^h)(W+1) + P_{ci}^h W(1-(2P_{ci}^h)^m)} \quad (5)$$

其中,  $m$  表示最大的退避状态. 不失一般性, 任何一个时隙的成功接入概率指有且只有一个认知用户在该时隙接入的概率, 表示为  $P_{si}^h = U_h \alpha (1-\alpha)^{U_h-1}$ . 则任何一个时隙的碰撞概率为  $P_{ci}^h = 1 - (1-\alpha)^{U_h-1}$ , 被占用概率为  $P_{bi}^h = 1 - (1-\alpha)^{U_h}$ . 连续用户在一个帧的接入失败概率近似为

$$P_f^h = (1 - (1-\alpha)^{U_h-1})^{M\alpha} \quad (6)$$

首发用户在接入信道之前需要进行检测, 理想条件下, 其检测概率为  $\epsilon = P_{bi}^l$ . 则任何一个时隙的接入概率为<sup>[15]</sup>

$$\beta = \beta_1 / \beta_2$$

$$\beta_1 = 2(1-2(\epsilon + (1-\epsilon)P_c^l))(1-\epsilon - (1-\epsilon)P_c^l) \quad (7)$$

$$\beta_2 = (1-2(\epsilon + (1-\epsilon)P_c^l))(W+1)$$

$$+ (\epsilon + (1-\epsilon)P_c^l) W(1 - (2(\epsilon + (1-\epsilon)P_c^l))^m)$$

任何一个时隙的成功接入概率为  $P_{si}^l = U_l \beta (1-\beta)^{U_l-1} (1-\epsilon)$ , 碰撞概率为  $P_c^l = (1 - (1-\beta)^{U_l-1}) (1-\epsilon)$ . 则首发用户在一个帧内的接入失败概率为

$$P_f^l = (\epsilon + (1 - (1-\beta)^{U_l-1}) (1-\epsilon))^{M\beta} \quad (8)$$

把式(6)、(8)带入式(4)得到各个状态的用户数.

### 3.3 系统容量

连续用户和首发用户成功完成一次接入的平均时间分别为  $T_{si}^h = T_{slot} / P_{si}^h$  和  $T_{si}^l = T_{slot} / P_{si}^l$ . 则一帧时间内成功接入的用户数近似计算为  $L_s = L_s^h + L_s^l$ , 其中  $L_s^h \approx \lfloor T_C / T_{si}^h \rfloor$ ,  $L_s^l \approx \lfloor T_C / T_{si}^l \rfloor$ . 用  $T_i$  表示第  $i$  个用户的数据传输时间,  $b$  表示数据传输速率, 理想条件下(即传输过程中没有丢包), 系统容量表示为

$$S = b \sum_{i=1}^{L_s} T_i / T_f.$$

连续用户的统计容量为

$$\frac{b}{T_f} (L_s^h T_D + (\sum_{k=1}^{L_s^h} T_C - k T_{si}^h)) = \frac{b L_s^h}{T_f} (T_D + T_C - \frac{(1+L_s^h) T_{si}^h}{2})$$

首发用户的统计容量为

$$\frac{b L_s^l}{T_f} (T_D + T_C - \frac{(1+L_s^l) T_{si}^l}{2})$$

则该非饱和网络的网络容量表示为

$$S = b [L_s^h T_D + L_s^h (T_C - \frac{(L_s^h+1) T_{si}^h}{2}) + L_s^l (T_C - \frac{(L_s^l+1) T_{si}^l}{2})] / T_f \quad (9)$$

### 3.4 接入时延

接入时延指的是从准备信道接入到成功接入控制信道的时间间隔. 分别用  $D_h$  和  $D_l$  表示连续用户和首发用户的平均接入时延. 根据协议分析已知, 当前帧没有成功接入的用户会退避到下一个帧继续接入, 因此接入时延包括帧内时延和帧间时延两部分, 分别用  $D_{in}^h$  ( $D_{in}^l$ ) 和  $D_{out}^h$  ( $D_{out}^l$ ) 表示. 连续用户的接入时延表示为

$$D_h = D_{in}^h + D_{out}^h \quad (10)$$

$$\text{其中, } D_{in}^h = \frac{1}{L_s^h} (0 + T_{si}^h + 2T_{si}^h + \dots + (L_s^h - 1) T_{si}^h)$$

$$= \frac{T_{si}^h (L_s^h - 1)}{2},$$

$$D_{out}^h = \sum_{k=1}^{\infty} k T_f (P_f^h)^k = \frac{P_f^h T_f}{(1 - P_f^h)^2}.$$

同理, 首发用户的接入时延表示为

$$D_l = D_{in}^l + D_{out}^l \quad (11)$$

$$\text{其中, } D_{in}^l = \frac{1}{L_s^l} (0 + T_{si}^l + 2T_{si}^l + \dots + (L_s^l - 1) T_{si}^l)$$

$$= \frac{T_{si}^l (L_s^l - 1)}{2},$$

$$D_{out}^l = \sum_{k=1}^{\infty} k T_f (P_f^l)^k = \frac{P_f^l T_f}{(1 - P_f^l)^2}.$$

因此, 系统的平均接入时延为

$$D = \frac{D_h \pi_h + D_l \pi_l}{\pi_h + \pi_l} \quad (12)$$

### 3.5 被阻塞概率

首发用户的被阻塞概率主要是由于检测到信道忙而退避的概率, 即首发用户在一个帧的平均被阻塞接入概率为  $\epsilon = P_{bi}^l$ .

## 4 仿真结果与性能分析

本节主要从系统的吞吐能力, 理论模型验证, 系统性能三方面分析该协议的性能. 使用 matlab 仿真工具, 参数设置如表 1 所示.

表 1 仿真参数描述

参数	值	参数	值
$T_f$	100ms	$t_{SIFS}$	10E-3ms
$T_S$	10ms	$t_{DIFS}$	50E-3ms/70E-3ms
$T_C$	40ms	RTS	20byte
$P$	0.5	CTS	10byte
Head	16byte	$\tau$	10E-3ms

### 4.1 协议的吞吐能力

将该接入协议应用于传统的分布式网络:即不用频谱检测,用户在控制信道上完成信息交互之后直接在该信道上进行数据传输.数据包长度为 128bit,传输速率为 512e3bps,时隙长度为 0.25ms,  $p_0 = 0.5$ . 100 个认知用户,仿真时间为 2e5ms. 图 3、4 描述了该协议的吞吐能力和时延特性. 显然,在低负载时,较之于经典的 CSMA, S-CSMA, S-ALOHA 无线接入协议(仿真中传输时延与分组长度的比值为 0.1,采用二进制指数退避算法), CP-MAC 协议在不降低吞吐能力的同时降低了系统的接入时延.

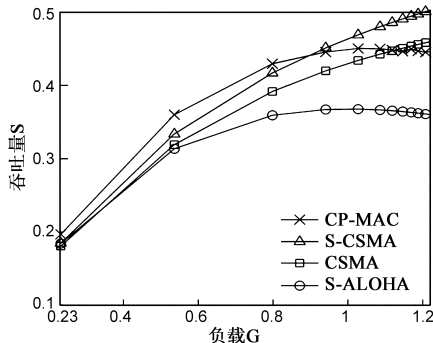


图3 非认知网络接入协议的系统容量  $W=16$

CP-MAC 协议中,同步会降低时隙的利用率,但首发用户会退避于连续用户,因此一个时隙的成功接入概率较之于传统的接入协议会增加  $U/(2^U - U)$ ,非饱和容量也随之提升,尤其在负载比较低的时候.但是随着负载的增大,碰撞概率增大,非饱和容量呈现出下降的趋势.

由于式(10)~(12)是失败概率的增函数,碰撞

概率是负载的增函数,因此系统时延随着负载的增大呈现出上升的趋势.另一方面,由于首发用户受到检测退避和碰撞退避两种制约,其时延随着负载的增加呈现指数上升趋势;连续用户一旦产生了连续性需求会在紧接着的下一个时隙传输数据,因此其接入时延没有明显的上升趋势.

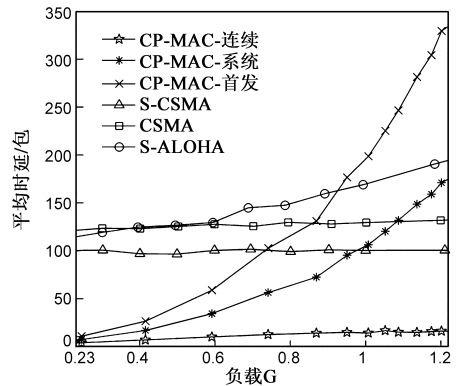


图4 非认知网络接入时延  $W=16$

### 4.2 理论模型验证

图 5(a) 给出了当  $p_0 = 0.5$  时用户状态的分布概率. 由于非成功接入业务包的积压效应,首发用户的个数逐渐增大,而连续用户和空闲用户的数目逐渐减小. 随着用户数的增多,时隙利用率增大,但当用户数持续增加时,接入碰撞概率增加(如式(6)、(8)所示,失败概率是用户数的增函数),因此系统容量存在一个最大值. 用户数的增加带来的更大的网络负载,因此其接入时延与图 4 一致. 首发用户的接入受到连续用户的阻挠,因此其阻塞概率随着连续用户个数的变化趋势而变化.

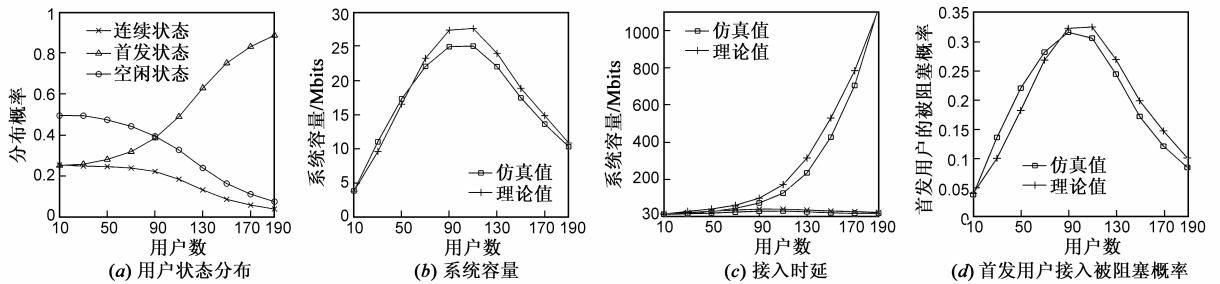


图5 用户数对系统性能的影响

### 4.3 协议性能分析与讨论

较之于具有 QoS 保障功能的 OMC-MAC 协议<sup>[11]</sup>, 论文分析了 EDCA 协议和 CP-MAC 协议的性能. EDCA 协议指的是直接将 EDCA 协议应用于竞争时期,设置竞争窗口时间差为 20e-3ms. 图 6(a)、(b)描述了协议的接入时延性能,EDCA 协议和 CP-MAC 协议基本在一帧之内完成接入过程,但 CP-MAC 协议的接入时延更小,这样就会预留出更多的时间传输数据,提高了系统的吞

吐能力. 由于 CP-MAC 是以牺牲首发用户的接入时延为代价的,因此,系统的平均接入时延只有在用户数比较少的时候最小. 观察图 6(c)、(d),显然 CP-MAC 可以提供最大的接入概率,但由于首发用户成功接入概率比较低,因此系统的平均接入概率较 EDCA 协议低.

图 7 分析了数据业务产生概率对连续性接入概率和接入时延的影响,当  $p_0$  趋近于 0 或者趋近于 1 时,系统中只存在一种用户,协议退化为 S-ALOHA 或者 S-

CSMA协议,没有优先级的退避保护措施,不但时隙被浪费,而且接入碰撞概率增大,因此成功概率在两个极端位置上比较低,而当系统中同时存在连续用户和首发

用户时,受到检测退避机制的保护,连续用户的接入概率增大.同理,接入时延也受到系统用户状态分配的影响,在两种用户都存在的时候,性能最佳.

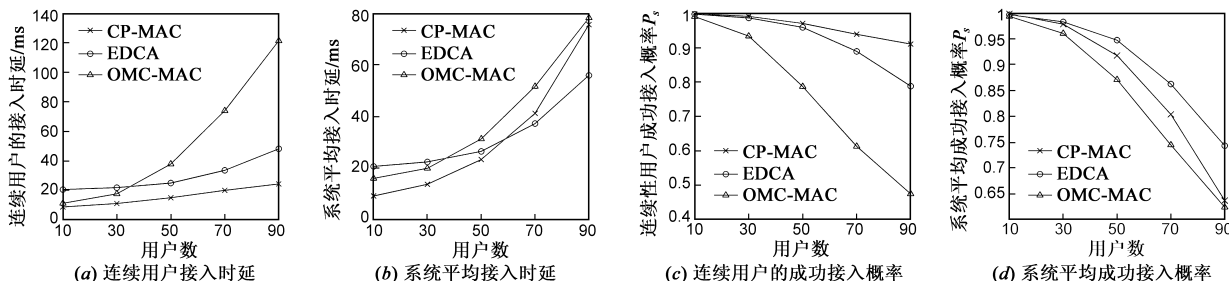


图6 接入时延与成功接入概率与用户数之间的关系曲线, OMC-MAC: 优先级时间设置为  $T/2$

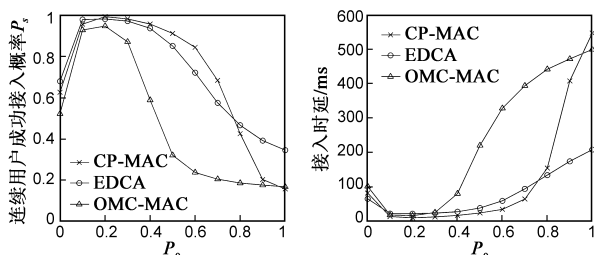


图7 连续用户性能与数据业务产生概率之间的关系( $U=100$ )

### 5 结论

非饱和分布式认知无线网络中,论文提出了适用于低负载情况下的具有连续性保障功能的 MAC 接入协议,并给出了理论分析模型.该 MAC 协议较之于目前的 QoS 保障的接入协议能够提供更好的连续性保障.

### 参考文献

[1] P802.22/D2.0. IEEE Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Wireless Regional Area Networks (WRAN)-Specific Requirements-Part 22[S]. 2011. 1 - 698.

[2] Liang Y C, Chen K C, et al. Cognitive radio networking and communications; An overview[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 3386 - 3407.

[3] 刘琪, 苏伟, 等. 基于跳频的自适应频谱共享方案[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 105 - 110.

Liu Qi, Su Wei, et al. A daptive spectrum sharing scheme based on FH communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38 (1): 105 - 110. (in Chinese)

[4] Yau A K L, Komisarczuk P, et al. On multi-channel mac protocols in cognitive radio networks[A]. IEEE Telecommunication Networks and Applications Conference [C]. Australasian: IEEE, 2008. 300 - 305.

[5] 韩小博, 罗涛. Ad Hoc 认知无线网络中基于博弈论的

公共信道建立算法[J]. 电子学报, 2010, 38(7), 1169 - 1704.

Han Xiaobo, Luo Tao. Commonchannel establishing algorithms based on game theory in Ad Hoc cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1169 - 1704. (in Chinese)

[6] Domenico A D, Strinati E C, et al. A survey on mac strategies for cognitive radio networks[J]. IEEE J Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(1): 21 - 44.

[7] Jia J, Zhang Q, et al. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive mac for efficient spectrum management[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 106 - 117.

[8] Cordeiro C, Challapali K. C-MAC: A cognitive mac protocol for multichannel wireless networks[A]. IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Dublin: IEEE, 2007. 147 - 157.

[9] Le L, Hossain E. OSA-MAC: A mac protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. Las Vegas: IEEE, 2008. 1426 - 1430.

[10] Chen Q, Liang Y C, et al. A two-level mac protocol strategy for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (5): 2164 - 2180.

[11] Satish C J, Umesh P, et al. Design of OMC-MAC: An opportunistic multi-channel mac with QoS provisioning for distributed cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3414 - 3425.

[12] Li J Y, Gao J, et al. Design of QSPM-MAC quasi-synchronous priority multi-channel mac access protocol[A]. IEEE Conference on Wireless Communications and Signal Processing[C]. Huang Shan: IEEE, 2012.

[13] 朱颖, 武穆清. 基于 802.11e 的无线多跳自适应合作式 QoS 算法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2350 - 2357.

Zhu Ying, Wu Mu-qing. Adaptive cooperation algorithm for QoS guarantee in multi-hop transmission based on 802.11e

[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2350 – 2357. (in Chinese)

[14] Bianchi G. IEEE802. 11-Saturationthroughput analysis [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(12): 318 – 320.

[15] Ziouva E, Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis [J]. IEEE Magazine on Computer and Communications, 2002, 25(3): 313 – 321.

#### 作者简介



**谢小可** 男, 1984 年出生于河南平顶山. 北京邮电大学博士研究生, 研究方向为移动通信, 通信管理工程.

E-mail: xiexiaoke@hotmail.com



**唐菁敏** 男, 1979 年出生于湖南益阳. 博士, 研究方向为下一代宽带无线通信.

E-mail: tang\_min213@163.com



**李静叶** 女, 1984 年出生于河北石家庄. 北京邮电大学博士研究生, 研究方向为移动通信, 认知无线网络.

E-mail: lijingye@bupt.edu.cn