

认知无线网络中基于业务区分的多信道 MAC 协议

江帆¹, 王本超²

(1. 西安邮电学院通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要: 为了满足认知无线网络中认知用户的业务服务质量需求, 提出了一种基于业务区分的多信道媒体接入协议(SD-MAC). 根据授权用户的信道使用模型以及认知用户的业务类型, 实时业务采用基于预约的接入机制, 而非实时业务则通过采用基于竞争的接入算法实现信道共享. 理论分析和仿真结果表明, 所提出的 MAC 协议能够有效提高实时业务的吞吐率, 保证较低的接入时延, 从而有效地提升系统性能.

关键词: 认知无线网络; MAC; 动态频谱共享; 服务质量

中图分类号: TN925.8

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0141-06

随着信息技术与应用需求的快速发展, 人们对无线通信频谱资源的需求越来越大. 日益增长的频谱需求和有限的频谱资源之间的矛盾, 成为制约无线通信发展的主要因素之一. 然而, 作为无线通信最宝贵的资源, 日趋匮乏的频谱资源却并未被合理利用, 仍然存在着大量的空闲“空洞”, 导致了频谱资源的浪费. 为了解决频谱资源的短缺与浪费之间的矛盾, 基于认知无线电技术的认知无线网络应运而生^[1]. 在认知无线网络中, 授权使用某频段的用户称授权用户(PU, primary user); 没有授权使用频谱的用户称为认知用户(SU, secondary user), 它须以不影响 PU 的正常通信为前提, 以机会式的方式接入尚未被 PU 使用的空闲授权频段, 从而有效的提高频谱资源的利用率.

媒体接入控制(MAC)协议是一种实现频谱资源高效动态分配与管理重要技术, 其设计对于认知无线网络的性能发挥起到举足轻重的作用^[2]. 目前, 有关认知无线网络中的 MAC 协议研究主要集中在保证网络整体性能最优的动态频谱共享方面^[3]. 在相关的研究中, Su^[4]提出了一种基于跨层的机会式 MAC 协议, 考虑了两种信道检测策略对于频谱效率的影响. Timmers^[5]提出了一种适用于认知无线网络的节能型多信道 MAC 协议. 所提出的协议通过用户周期性的休眠来减少能量消耗, 并且考虑了两种信道检测策略. 然而, 上述方法大都以信道检测策略作为出发点, 忽略了 SU 用户的 QoS 需求. 针对以上问题, 本文提出了一种基于业务区分的多信道 MAC 协议-SD-MAC. 为了保证 SU 用户不同业务的 QoS 需求, 实时业务(RT, real time)通过预约未使用的授权信道来优先接入信道. 而非实时用户(NRT, non-real time)则通过采用基于竞争的方式共享剩余的空闲授权信道. 通过建立相应的理论模型和仿真对于所提出协议的性能进行了分析, 并考虑了检测错误存在情况下的系统性能.

1 SD-MAC 协议

1.1 系统模型

图 1 描述了所提出 SD-MAC 的原理. 考虑一段划分为 $N+1$ 条信道的授权频谱, 所有的信道具有同样的带宽, 并且相互不重叠, 因此在不同信道上的数据传输彼此不干扰. 其中, 一条信道定义为公共控制信道(CCC, common control channel), 且该信道 PU 不能够使用. 对于剩下的 N 条信道, 每条信道都划分为固定长度的时隙结构, 并且其工作状态可以模拟为 ON-OFF 状态. 其中 ON(占用)状态表示 PU

收稿日期: 2011-08-30 修改稿日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172071); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ8027); 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(11JK1009)

作者简介: 江帆(1982-), 女, 江苏盐城人, 博士, 讲师, 主要研究方向为下一代无线网络 MAC 层关键技术.

正在某时隙使用该信道,而 OFF(空闲)状态则表示某时隙该信道空闲.因此 ON/OFF 模型可用来描述某一时隙 PU 的使用该信道的状况.假设若干个 SU 以不干扰到 PU 的正常通信为前提,在信道处于 OFF 阶段时以机会式的方式尝试接入信道.另外, SU 与 PU 之间是时间同步的.每个 SU 装备 2 个收发器,其中一个收发器工作在 CCC 上,用于检测 N 条授

权信道的使用情况及协调 SU 之间的信道使用权,另外一个收发器用于专门的数据传输.

1.2 协议描述

每个 SU 通过工作在 CCC 信道上的收发器检测信道的使用情况.假设网络中共有 U 个 SU 用户.在每个时隙开始时刻, SU 首先利用工作在 CCC 上的收发器检测 N 条信道的使用状况.其中公共控制信道 CCC 划分为两部分:检测汇报阶段和协商阶段.检测汇报阶段又划分为 N 个子时隙,与 N 条授权信道对应.

在检测汇报阶段,每个 SU 在 N 条信道中随机选择一条信道 $i, i \in [1, N]$ 进行检测.根据检测得到的信道占用情况,在时隙 t , SU 构造两类数据:一类定义为 PU 的频谱信息(SIP),另外一类数据称为认知用户的数据类型(SST).SIP 包含了第 i 条信道的使用信息,它有以下两种取值:1) 在 t 时隙,信道 i 没有被 PU 占用, $SIP_i(t) = 0, i \in [1, N]$; 2) 在 t 时隙,信道 i 被 PU 占用, $SIP_i(t) = 1, i \in [1, N]$.因此, SIP 的取值决定了某一信道是否可以被 SU 用来进行数据传输. SST 则包含了 SU 需要发送数据类型的信息,如果 SU 有实时业务发送则,置 $SST = 1$,否则置 $SST = 0$.

在检测汇报阶段的 N 个子时隙内,根据检测结果,每个 SU 在信道对应的子时隙内发送 beacon 帧. Beacon 帧中包含 SIP 与 SST 信息.通过 SU 之间彼此交互 beacon 帧,相邻的节点可以获得信道的检测结果以及 SU 的业务状况.如果相邻节点检测的是同一条信道,则在 $t+1$ 时隙,它们分别选择检测其它的信道.如果 N 条信道中的任意一条都被 SU 检测过,则通过节点之间交互 beacon 帧,每个 SU 可以获得整个网络信道的使用状况.如果 SU 的数目少于信道的数目,则每个 SU 只能获得部分信道使用信息.

根据检测汇报阶段的信息,在协商阶段,具有实时业务发送的 SU 首先预约信道.假设时隙 t ,具有 RT 的用户数目为 M .由于在检测汇报阶段, SU 之间已通过发送 beacon 帧交互信息,则具有 NRT 业务发送的 SU 可以获知 M 的信息,图 2 给出了协商阶段的时隙结构示意图.根据 M 的取值,预约信道划分成又 M 个长度为 T_{mis} 的小时隙,图示为 $M=2$ 的情况.

根据交互 beacon 帧所获得的信息,在预约期,有 RT 业务发送的 SU 选择一条检测到空闲的信道作为下一时隙的数据传输信道,并通过发送控制分组来预约该信道.一个成功的控制信息交互过程包括:发送 RTS,接收 CTS,以及相应的帧间间隔.一次失败的控制信息交互仅包括发送 RTS.预约失败的原因是 RTS 所预约的信道已被预约或者 RTS 分组碰撞.成功预约到信道的 SU 在下一时隙开始时传输 RT 业务,从而实现无冲突的传输.

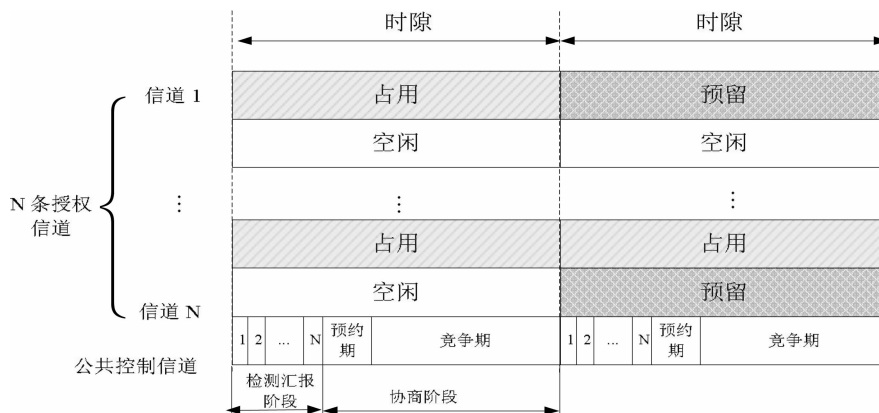


图 1 SD-MAC 原理

Fig. 1 The principle of SD-MAC

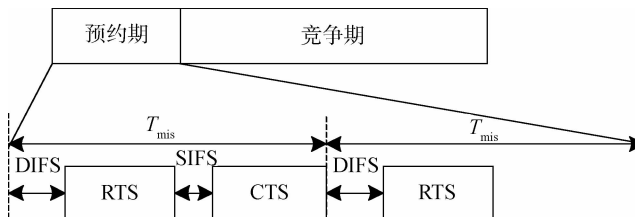


图 2 协商阶段的时隙结构

Fig. 2 Timeslot structure of negotiation period

M 个具有 RT 业务的 SU 预约完毕之后, 具有 NRT 业务的 SU 在竞争期通过采用 IEEE 802.11 DCF 机制^[6]或者 p 坚持的载波侦听多址(CSMA)^[7]等竞争的方式共享剩余的空闲授权信道. 成功竞争到信道的 SU 在下一个时隙发送 NRT 业务, 竞争失败的 SU 则采取相应的退避算法之后再次竞争信道.

2 SD-MAC 协议理论分析

2.1 不考虑检测错误

首先, 不考虑 SU 检测过程中存在的错误, 评估所提出的 SD-MAC 的性能. 假设每个 PU 随机的在一段时间内使用信道进行数据传输, 根据 ON/OFF 模型, 假设第 i 条信道, $i \in [1, N]$, PU 从 ON 状态转移到 OFF 状态的概率为 α_i , PU 从 OFF 状态转移到 ON 状态的概率为 β_i , 则信道状况可描述为图 3 所示的两状态马尔科夫链模型.

根据所述 SD-MAC 协议, SU 通过检测信道来获知信道的使用情况, 检测结果反映在 SIP 值中. 在 t 时隙, 假设网络中的 SU 数目足够多^[8-9], 则网络的信道使用状况可描述为 $[SIP_1(t), SIP_2(t), \dots, SIP_N(t)]$. 因此, PU 在第 i 条信道的利用率 η_i 可以计算为

$$\eta_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T SIP_i(t)}{T} = \frac{\beta_i}{\alpha_i + \beta_i} \quad (1)$$

由于 N 条授权信道之间彼此统计独立, 则如果观察时间 T 足够长, 可以得到所有 N 条信道具有同样的信道利用率 η , 表示为

$$\eta = \eta_i = \eta_j, i, j \in [1, N], i \neq j \quad (2)$$

因此, 在时隙 t , SU 检测到未被 PU 占用的授权信道的数目为 k 的概率 $P_{UCN}(t)$ 计算为

$$\Pr\{P_{UCN}(t) = k\} = \begin{cases} \binom{N}{k} \eta^{N-k} (1-\eta)^k, & U \geq N \text{ and } 0 \leq k \leq N \\ \binom{U}{k} \eta^{U-k} (1-\eta)^k, & U \leq N \text{ and } 0 \leq k \leq U \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式可以解释为: 如果在不考虑检测错误的情况下, 剩余的未被占用的授权信道数目取决于 PU 的信道利用率. 因此, 在时隙 t , SU 可以使用的授权信道的数目 $\overline{P_{UCN}}$ 计算为

$$\overline{P_{UCN}} = \sum_{k=0}^N k \Pr\{P_{UCN}(t) = k\} \quad (4)$$

* 饱和吞吐量分析

饱和吞吐量是考察 MAC 协议性能的重要指标之一. 如果分别用 T_S , T_{SP} , 和 T_{NP} 表示一个时隙的长度, 检测汇报阶段的长度和冲突阶段, 则可以得到如下关系

$$T_S = T_{SP} + T_{NP} = NT_{ms} + T_{NP} \quad (5)$$

其中 T_{ms} 表示构成检测汇报阶段的每一个小时隙的长度. 假设 RT 业务的到达率为 γ , 并且 SU 一直有数据要发送. 可以得到, 在不考虑检测错误的情况下, 具有 RT 业务的 SU 的饱和吞吐量:

$$S_{RT}^{free} = \frac{\overline{P_{UCN}} \gamma R T_{NP}}{T_S} \quad (6)$$

这里, R 表示授权用户的信道传输速率. (6) 式表示: 一旦 SU 获得了频谱使用权之后, 它就立即开始发送数据. 根据 SD-MAC 协议, 具有 RT 业务的 SU 将在下个时隙无冲突的在所预约的信道上发送数据. 由于每个 SU 装配了两套收发设备, 数据的传输从汇报阶段结束之后立即开始(为了保证信道检测结果的准确, 检测汇报阶段 SU 不发送数据), 因此 T_{CP}/T_S 表示了数据传输所占的时间比例. 同样, 在不考虑检测错误的情况下, 可以得到具有 NRT 业务的 SU 的饱和吞吐量为

$$S_{NRT}^{free} = \frac{\overline{P_{UCN}} (1-\lambda) R T_{CP}}{T_S} \quad (7)$$

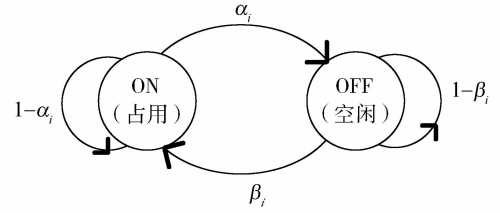


图 3 授权用户使用信道的 ON-OFF 模型

Fig. 3 ON-OFF channel usage model of primary users

* 平均接入时延分析

假设所有业务在每个时隙开始时刻到达,对于具有 RT 业务的 SU 来说,首先需要等待检测汇报阶段 T_{SP} 长度,然后根据检测的结果预约尚未使用的授权信道.因此,平均接入时延 T_{RT} 表示为

$$T_{RT} = mT_{ms} + T_s P_{suc}^{RT} + T_s \sum_{i=1}^{\infty} i (1 - P_{suc}^{RT})^{i-1} \quad (8)$$

其中 $P_{suc}^{RT} = 1 - \sum_{i=2}^{\lceil U\lambda \rceil} \binom{i}{U\lambda} \left(\frac{1}{P_{UCN}}\right)^i$ 代表 RT 业务成功预约到一条授权信道的概率 $\lceil U\lambda \rceil$ 表示向上取整.

(8) 式表明,RT 业务的平均时延由三部分构成:检测汇报阶段时间长加上成功传输所需的时间,以及传输失败所需要等待的时间.

在竞争期阶段,具有 NRT 业务的 SU 通过竞争的方式来共享剩余的未被使用的授权信道.我们以基于 IEEE 802.11 DCF 机制的竞争算法来分析 SU 的接入性能.根据 DCF 机制,具有 NRT 业务的 SU 通过发送 RTS/CTS 等控制信息来尝试接入信道.当且仅当只有一个 SU 发送控制信息竞争信道,则这个竞争期可以定义为成功.否则,定义这个竞争期为失败(如果多余一个用户发送控制信息,则控制信息将会碰撞).设 P_a 表示 SU 在任意一个时刻 SU 尝试发送控制信息的概率, P_{cp} 表示控制信息会发生碰撞的概率.则根据文献[10]中所建立的两维马尔科夫链, P_a 可以表示为

$$P_a = \frac{2(1 - P_{cp})}{(1 - 2P_{cp})(W + 1) + P_{cp}W(1 - (2P_{cp})^m)} \quad (9)$$

其中, $W = CW_{min}$ 表示 DCF 机制中所规定的最小退避窗口, m 表示最大的退避次数.如果退避窗口的大小 W 取恒定值时, P_a 可以简化为 $P_a = 2/(W + 1)^{[10]}$.假设具有 NRT 业务的 SU 数目为 N_{NRT} ,则可以得到 $N_{NRT} = U(1 - \lambda)$.设 P_{suc}^{NRT} 表示在某一竞争期内 SU 成功发送控制信息概率,则有:

$$P_{suc}^{NRT} = \overline{P_{UCN}}(1 - \lambda)P_a(1 - P_a)^{N_{NRT}-1} \quad (10)$$

因此,对于具有 NRT 业务的 SU 来说,平均接入时间 T_{NRT} 可表示为

$$T_{NRT} = mT_{ms} + T_s P_{suc}^{NRT} + T_s \sum_{i=1}^{\infty} i (1 - P_{suc}^{NRT})^{i-1} \quad (11)$$

2.2 考虑检测错误

定义 SU 未能正确检测到信道 i 已被 PU 占用的概率为 $P_e^{(i)}$.假设信道之间是同质的,因此有 $P_e = P_e^{(i)} = P_e^{(j)}$, $i, j \in [1, N]$, $i \neq j$,即不同信道的错误检测概率相同,定义为 P_e .此外,每个用户根据检测的结果独立的做出决策.因此,只有当发送机和接收机共同检测出信道 i 空闲时,才选择信道 i 作为数据传输信道.

考虑到错误检测的情况下,SU 即使获得了使用授权信道的机会,但是并不能保证数据传输的成功.这是由于所检测到的空闲信道也许已被 PU 占用.因此,在时隙 t ,考虑错误检测概率情况下,SU 检测到未被 PU 占用的授权信道的数目为 k 的概率 $P_{UCN}^{md}(t)$ 相应的更新为

$$\Pr\{P_{UCN}^{md}(t) = k\} = \begin{cases} \binom{N}{k} \eta^{N-k} (1 - \eta)^k [1 - P_e^2(1 - \eta)]^k, & U \geq N \text{ and } 0 \leq k \leq N \\ \binom{U}{k} \eta^{U-k} (1 - \eta)^k [1 - P_e^2(1 - \eta)]^k, & U \leq N \text{ and } 0 \leq k \leq U \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

3 仿真结果

在这一节中,我们将根据上一节的理论分析模型评估所提出 SD-MAC 的性能.在仿真评估中,所采用的参数如表 1 所示.

根据上一小节所推导的理论模型,图 4 分别给出了有无检测错误情况下,RT 业务的饱和吞吐量.从图中可以看出,随着认知用户数目的增加,饱和

表 1 仿真所采用参数

Tab. 1 Simulation parameters adopted

Parameters	value	Parameters	value
CTS	38 Bytes	DIFS	34 μ s
L	250 Bytes	N	10
T_{ms}	9 μ s	γ	0.2
T_s	1.89 ms	P_a	0.2
R	1Mbps	P_e	0.1
RTS	44 Bytes	SIFS	15 μ s

吞吐量逐渐线性增加. 当 SU 用户的数目等于授权信道的数目时, 吞吐量达到最大. 此外, 当 SU 用户数目大于授权信道数目时, 吞吐量保持恒定. 这种现象可以解释为: 根据所提出的 SD-MAC, RT 业务在 NRT 业务接入之前, 首先预约剩余未被占用的授权信道. 尽管用户数目增加, 由于能够接入的信道数目不变, 因此 RT 业务的饱和吞吐量维持不变. 另外, 可以观察到信道的利用率越高 (η 越大), 饱和吞吐量越低. 这是因为 PU 越频繁的使用授权信道, 则 SU 能够利用空闲信道的机会就越小, 从而导致吞吐率的下降. 另外, 考虑到检测错误之后, 饱和吞吐率略微有所下降, 这个现象也与之前的分析一致.

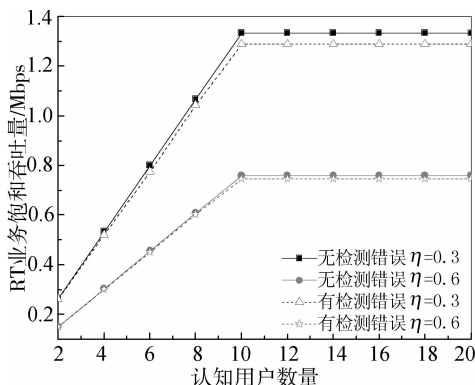


图4 RT业务饱和吞吐量

Fig. 4 The saturation throughput of RT services

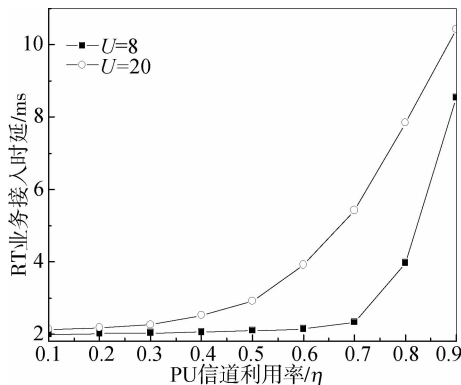


图5 RT业务接入时延

Fig. 5 The access delay of RT services

图5描绘了RT业务的接入时延与PU信道利用率之间的关系. 其中分别考虑了SU用户数等于8和20的两种情况. 授权信道数目 $N=10$, 并且RT业务的生命期为3个时隙(即如果3个时隙数据未能成功发送则丢弃). 从图中可以看出, 当PU的信道使用率较低时即 η 取值较小时, 根据所提出的 SD-MAC, 通过信道检测, SU 能够有效的利用尚未使用的授权信道传输 RT 业务. 这是由于所提出的 SD-MAC 能够保证实施业务优先预约空闲的信道, 从而能够保证 RT 业务的服务质量. 另外, 可以看出随着信道利用率的增加, 由于 PU 越来越频繁的使用信道, SU 检测到空闲信道的概率降低, 从而使得能够使用的空闲信道逐渐减少, 因此导致 RT 接入时延的增加. 当用户数目多余信道数时 ($U=20$), 可以观察到接入时延的随着信道利用率的变化更为明显.

图6给出了不同PU信道利用率下NRT业务的接入时延. 其中同样分别考虑了SU用户数为8和20的两种情况. 授权信道数目 $N=10$, 并且假设NRT业务的生命期为3个时隙. 与图5相比, 可以看出同样的信道利用率情况下, NRT业务的接入时延远大于RT业务的接入时延. 这是由于在所提出的 SD-MAC 中, NRT业务是在RT业务预约完信道之后, 采用基于竞争的算法接入尚未使用的授权信道. 因此, 由于NRT业务之间由于竞争CCC信道冲突所造成的接入时延更明显. 另外, 当用户数目较多时 ($U=20$), 由于NRT业务之间的竞争更加激烈, 因此PU的信道使用率的变化对其接入性能的影响并没有对于RT业务接入性能的影响大. 这个现象与前一节的分析一致, 可以解释为: 由于RT业务依靠预约信道而实现无冲突的数据传输, 因此可使用的授权信道的数目直接影响着RT业务的接入性能. 而对于NRT业务来说, 即使有可使用的授权信道, 也首先需要在CCC上成功发送控制分组, 从而获得信道的使用权.

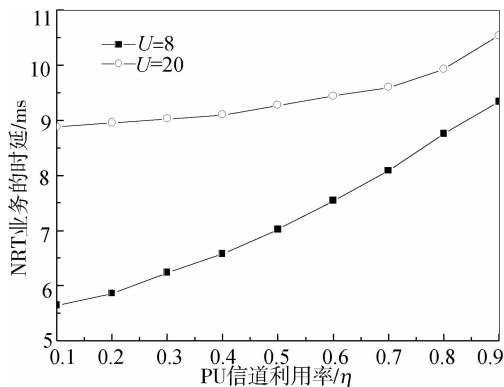


图6 NRT业务接入时延

Fig. 6 The access delay of NRT services

4 结论

提出了一种应用于多信道认知无线网络的基于业务区分的MAC协议-SD-MAC. SD-MAC综合考

虑了认知用户的不同 QoS 需求来合理的利用授权用户尚未使用的信道. 其中, 实时用户通过预约信道来实现快速的接入, 而非实时用户则通过采用基于竞争的接入方式共享剩余的授权信道. 考虑到授权用户和认知用户的特性, 建立了相应的理论模型来分析所提出协议的性能. 并且分析了检测错误存在情况下的系统性能. 仿真结果证明, 所提出 SD-MAC 的能够有效提高实时业务的吞吐率并降低接入时延, 从而有效提升系统性能.

参考文献 References

- [1] AKYILDIZ I, LEE W Y, VURAN M C, et. al. Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: a survey [J]. Elsevier Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [2] CORMIO C, CHOWDHURY K R. A Survey on MAC protocols for cognitive radio networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(7):1315-1329.
- [3] DE D A, CALVANESE S E, DI B MG. A Survey on MAC strategies for cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Survey and Tutorials, 2010(99): 1-24.
- [4] SU Hang, ZHANG Xi. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisioning over cognitive radio wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1):118-129.
- [5] TIMMER M, POLLIN S, DEJONGHE A, et. al. A distributed multichannel MAC protocol for multi-hop cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1): 446-459.
- [6] IEEE Standard 802.11-1999 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. New York: IEEE Standards Board Press, 1999.
- [7] KLEINROCK L, TOBAGI F. Packet switching in radio channels: part I - carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics [J]. IEEE Transactions on Communications, 1975(23):1400-1416.
- [8] PAWELCZAK P, POLLIN S, SO H S W, et. al. Performance analysis of multichannel medium access control algorithms for opportunistic spectrum access [J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2009, 58(6):3014-3031.
- [9] JHA S C, RASHID M M, BHARGAVA V K. OMC-MAC: An opportunistic multichannel MAC for cognitive radio networks [C]. Alaska: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2009), 2009:1-5.
- [10] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas on Communications, 2000, 18(3): 535-547.

A service differentiating based MAC for multichannel cognitive radio networks

JIANG Fan¹, WANG Ben-chao²

(1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2. Huawei Technologies Co., Ltd. Bantian, Shenzhen 518129, China)

Abstract: A service differentiating based MAC (SD-MAC) protocol is proposed in this paper to meet the secondary user's requirement of quality of service for multi-channel cognitive radio networks. Specifically, according to channel utilization patterns of primary users as well as QoS requirements of secondary users, real time services reserve the leftover licensed channel for data transmission, while non-real time service adopts contention based algorithm to compete for channel access. Theoretical analysis and simulations demonstrate the performance benefits in terms of throughput and access delay, which leads to improved system performances.

Key words: cognitive radio network; medium access control; dynamic spectrum sharing; quality of service (QoS)