

认知无线网络随机接入 MAC 协议建模与性能分析

王晓飞* 张希 张权 唐朝京
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文采用马尔科夫链构建了认知无线网络随机接入 MAC 协议的数学模型, 提出了一种协议分析的理论方案。该方案建立了信道的三状态马尔科夫链模型, 通过引入授权信道限制率和稳态可用授权信道数的概念, 解决了信道状态时变特性给理论分析带来的挑战; 建立了基于离散 2 维马尔科夫链的信道协商模型, 并考虑控制信道容量限制等约束条件, 给出了协议饱和吞吐量的理论分析算法。仿真实验验证了所提方案的有效性, 分析了协议性能与网络参数之间的数值关系。

关键词: 认知无线网络; 随机接入; MAC 协议; 马尔科夫链模型

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-1007-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01090

Modeling and Performance Analysis of Random Access MAC Protocols in Cognitive Radio Networks

Wang Xiao-fei Zhang Xi Zhang Quan Tang Chao-jing

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A modeling and analysis scheme based on Markov chain for Random Access MAC (RA-MAC) protocol of cognitive radio networks are proposed. A three-state Markov chain model of channel is presented, while the problem of dynamic characteristic of channel is dealt with by introducing the channel constraint rate and the available channel number of stability. A channel negotiation model is designed based on discrete two-dimensional Markov chain. An algorithm to evaluate the saturation throughput of RA-MAC is presented, considering constraints of capacity of the control channel. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposals, and the relationship between protocol performance and parameters is analyzed.

Key words: Cognitive radio networks; Random access; MAC protocol; Markov chain model

1 引言

认知无线网络^[1](Cognitive Radio Networks, CRN)媒体接入控制(MAC)协议^[2]研究日益受到人们关注。认知MAC协议依控制机制不同分为随机接入^[3]、时隙接入^[4]和跳频接入^[5]三类, 而随机接入方案被认为是解决分布式频谱接入的有效手段。

目前, 学术界在随机接入MAC(RA-MAC)协议设计方面已取得一定进展, 但理论研究仍亟待完善。文献[6]利用2维马尔科夫链模型分析了IEEE 802.11 DCF协议的性能, 但该模型不适用于多信道MAC协议。针对多信道协议, 文献[7]提出了一种基于IEEE 802.11的分析方案, 但不适于信道状态动态变化的网络。文献[8]在分析异步多信道MAC协议时, 提出了一种利用协商过程中RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send)的时间约束关系分析控制信道性能的方法, 但未考虑主用户保护机制带来的控

制帧时长限制因素对协议性能造成的影响。

鉴于此, 本文将马尔科夫方法扩展为支持感知和多信道接入的模型, 提出一种分析RA-MAC协议的理论方案。考虑信道状态的时变性, 引入授权信道限制率和稳态可用授权信道数的概念, 建立信道的三状态马尔科夫链模型。建立基于2维离散马尔科夫链的信道协商模型, 考虑控制信道门限和主用户保护等条件, 分别求解控制信道饱和与非饱和时协议的理论吞吐量。建立网络仿真环境, 验证所提方案的有效性, 并讨论网络参数对协议性能的影响。

2 随机接入MAC协议描述

考虑由 Q 个主用户(Primary User, PU)和 N 个认知用户(Secondary User, SU)构成的分布式CRN场景。设 $\mathbf{CH} = \{\text{CH}_0, \text{CH}_1, \dots, \text{CH}_M\}$ 表示系统中 $M+1$ 个非重叠的信道, 其中, CH_m ($m = 1, 2, \dots, M$)为 M 个授权信道; CH_0 为专用的控制信道(Control Channel, CC), 与授权信道互不重叠。每个SU配备一个认知收发机(CRTR)和一个控制收发机(CTR), 前者负责感知授权信道和数据传输; 后者

2012-08-28 收到, 2012-11-30 改回

国家自然科学基金(61101073)资助课题

*通信作者: 王晓飞 wxfmudt@gmail.com

负责在 CC 上交互动感知信息和控制消息。SU 之间拥有某种定时机制，能同步实现频谱感知和感知信息共享，并通过信道状态列表(CSL)记录和维护。

RA-MAC 协议采用周期频谱感知和随机预约接入机制，执行过程包括信道感知(CSP)、信道协商(CNP)和数据传输(DTP) 3 个阶段，如图 1 所示。在 CSP 阶段，CTR 向 CC 竞争发送信标实现时间同步，控制 CRTR 进入静默状态。CRTR 则停止发送，感知授权信道的状态。之后，SU 在 CC 上共享频谱感知结果，并根据自身感知结果以及邻近节点共享的感知信息，维护和更新自己的 CSL。由于采用同步静默感知机制，可有效避免暴露感知节点问题，确保频谱感知的可靠性。在 CNP 阶段，SU 在

CC 上采用类似 IEEE 802.11 中 CSMA/CA 的机制，通过 CRTS/CCTS 握手和二进制指数退避方式实现竞争接入；通过在 CRTS 中携带源节点的 CSL，在 CCTS 中夹带商定后的预约授权信道信息的方式实现收发双方的信道协商。同时，邻近节点通过监听 CRTS 和 CCTS，获取最新的信道使用情况，并及时更新自身 CSL。在 DTP 阶段，源节点和目的节点通过 DATA/ACK 方式实现数据报文的传输。目的节点发送完 CCTS 后，将其 CRTR 切换至预约授权信道，准备接收。源节点在接收到 CCTS 后，根据 CCTS 所携信息将 CRTR 切换至指定的预约授权信道后(设切换延时为 T_{sw})，开始发送数据。数据传输完成后，双方通过交互 ACK 进行确认。

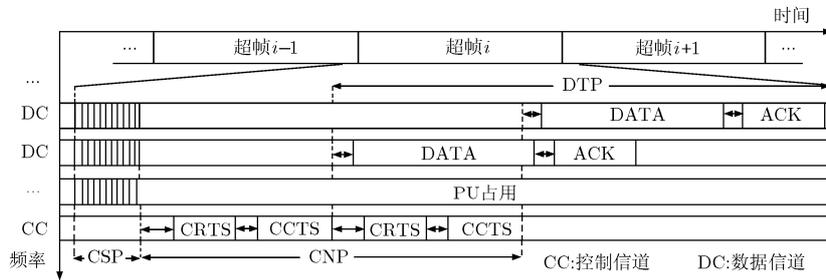


图 1 RA-MAC 协议的执行过程

3 协议建模与分析

为便于分析且不失一般性，假设如下：(1)任一 SU 同时至多使用一个授权信道；(2)PU 出现在任一授权信道的概率独立同分布；(3)信道协商成功后，源节点和目的节点在授权信道上可无差错的通信。

3.1 信道可用性模型

本文将 PU 和 SU 的信道占用情况视为一个随机过程，建立信道可用性的三状态马尔科夫链模型。设 T_{sf} 表示超帧持续时间， T_{cs} 表示 CSP 阶段的持续时间，SU 的感知周期与协议超帧时长一致。

定义 1 信道状态是指在时刻 t ，信道 CH_i ($i = 0, 1, \dots, M$) 被 PU 和 SU 占用的实时状态，表示为 $s_{CH_i}(t) = \{s \mid s = -1, 0, 1\}$ ，其中， $s = 0$ 为空闲态，即 CH_i 未被占用； $s = 1$ 为准空闲态，即 CH_i 被 SU 占用； $s = -1$ 为限制态，即 CH_i 被 PU 占用。

如图 2 所示，弧线上的数值表示由 $s(t)$ 状态变化到 $s(t+1)$ 状态的转移概率，从而构成一个 $S = \{-1, 0, 1\}$ 的三状态马尔科夫链。通常通过历史观测信息和预测，用户可以获得相应的转移概率密度函数及其分布^[9]，故可视上述状态转移概率为已知量。

对于 CC，SU 有完全使用权，无须考虑 PU 的影响，即 $\alpha_0 = 0, \beta_0 = 0$ 。CC 的描述即简化为经典的 ON/OFF 模型。对于授权信道，PU 具有优先使用权，且可持续占用；SU 须在感知到授权信道空闲

后方可接入，且持续占用时间不超过 T_{sf} 。

定义 2 可用授权信道集是指在时刻 t ，网络中所有空闲态或准空闲态授权信道构成的信道集合，表示为： $CH_A(t) = \{CH_i \mid s_{CH_i}(t) = 0, s_{CH_i}(t) = 1\}$ 。

定义 3 授权信道限制率是对 PU 使用授权信道频繁程度的一种度量，指授权信道 CH_i 处于限制态的期望概率，表示为： $C_i = E[P^j \{s_{CH_i}(t) = -1\}]$ 。

由定义和马尔科夫原理可知，网络达到平衡时，授权信道 CH_i 处于限制态的稳态概率即为 C_i 。由稳态分布的性质，可得 $C_i = \alpha_i \delta_i / [\alpha_i \delta_i + \beta_i (\gamma_i + \delta_i)]$ 。

定义 4 稳态可用授权信道数是指网络达到平衡后，处于空闲态和准空闲态的授权信道平均数量，记为 $M_A = E[\|CH_A(t)\|] = E[M_A(t)]$ ，其中 $M_A(t)$ 表示 t 时刻网络中可用授权信道的数量。

根据假设(2)，所有授权信道限制率相同，即 $\bar{C} = C_i$ ($i = 1, 2, \dots, M$)，则稳态可用授权信道数 $M_A = \lfloor \sum_{j=0}^M j C_M^j (1 - \bar{C})^j (\bar{C})^{M-j} \rfloor$ ，其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整运算。

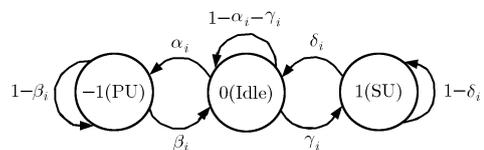


图 2 信道 CH_i 的三状态马尔科夫链模型

3.2 信道协商模型

在 CNP 阶段, CC 采用类似 IEEE 802.11 DCF 的握手和退避机制。协议可能因多个 SU 同时发送 CRTS 产生冲突, 但能保证 CCTS, DATA, ACK 被 SU 正确接收。因此, CRTS 退避过程用 2 维状态 $\{s(t) = i, b(t) = k\}$, $(0 \leq i \leq R, 0 \leq k < W_i)$ 描述, 简记为 (i, k) , 其中 $s(t) = i$ 为退避级数, $b(t) = k$ 为计数器的当前值, R 为退避的最大级数, $W_i = 2^i W_0$ 为第 i 级退避的窗口值, W_0 为最小退避窗口值。

令 p 表示 SU 发送 CRTS 时, 发生冲突的条件概率, 建立协议在 CC 上随机接入与退避过程的马尔科夫链模型^[7], 相应的一步状态转移概率如下:

$$\left. \begin{aligned} P\{i, k-1 | i, k\} &= 1-p, & k \in [1, W_i-1], & i \in [0, R] \\ P\{i, k | i, k\} &= p, & k \in [1, W_i-1], & i \in [0, R] \\ P\{i, k | i-1, 0\} &= p/W_i, & k \in [0, W_i-1], & i \in [1, R] \\ P\{0, k | i, 0\} &= (1-p)/W_0, & k \in [0, W_0-1], & i \in [0, R] \\ P\{R, k | R, 0\} &= p/W_R, & k \in [0, W_R-1] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当退避计数值为 0 时, SU 开始发送 CRTS, 则稳态条件下 SU 在任一时隙内发送 CRTS 的概率 $\tau = 2(1-p)(1-2p)/\{pW_0[1-(2p)^R] + (1-2p)(W_0+1)\}$ 。

3.3 控制信道门限

通过分析 PU 保护机制和信道容量限制, 确定 CC 协商能力的上限。RA-MAC 协议除了通过周期性感知机制保护 PU 使用授权信道的优先权外, 还会限制 SU 机会接入的持续时间, 以避免 SU 因未及时空出超时占用授权信道, 造成对 PU 的干扰。这些保护机制会限定信道协商的能力。当 CC 达到饱和后, 如果有新的信道协商请求, 可能之前建立的数据传输过程已结束, 其数据信道变为空闲; 或是达到了超帧时长的限制, 协议无法再分配更多的数据信道, 否则将引起数据传输与下一超帧的冲突, 造成暴露感知节点问题, 如图 3 所示。

令 $T_{ctrl} = T_{DIFS} + T_{crts} + \delta + T_{SIFS} + T_{ccts} + \delta$ 表示

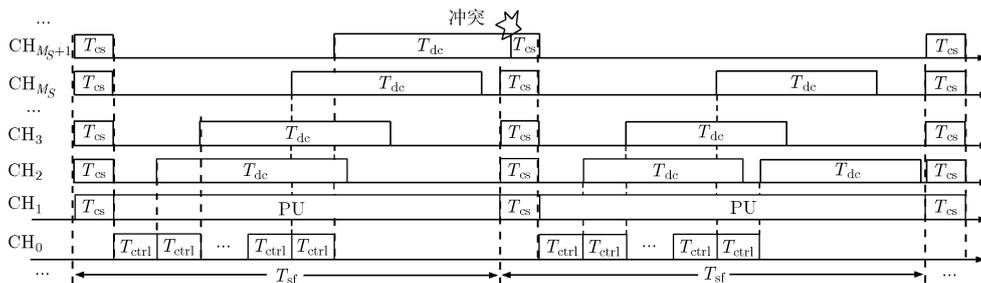


图 3 控制信道门限模型

CRTS/CCTS 成功传输完成一次信道协商占用 CC 的时间, $T_{dc} = T_{sw} + T_{data} + \delta + T_{SIFS} + T_{ack} + \delta$ 表示一次成功的数据传输所占用数据信道的的时间, T_{crts} , T_{ccts} , T_{data} , T_{ack} 分别表示传输 CRTS, CCTS, DATA 和 ACK 所需的时间; δ 为网络平均传输时延。

定义 5 控制信道门限 M_S 是指当网络达到平衡后, 在一个超帧时限内, 通过随机竞争接入方式 CC 所能完成的信道协商的最大成功次数, 即网络中能同时供 SU 进行数据传输的授权信道的最大数量。

定理 1 RA-MAC 的控制信道门限 $M_S = \min \{ \lfloor (T_{dc} - T_{sw}) / T_{ctrl} \rfloor, \lfloor (T_{sf} - T_{dc} - T_{cs}) / T_{ctrl} \rfloor \}$ 。

证明 根据图 3 所示模型, 分两种情况讨论。

当 $T_{sf} \geq 2T_{dc} - T_{sw} + T_{cs}$ 时, 导致 CC 饱和的主要因素是出现可重用的数据信道, 可得 $M_{S1} = \lfloor (T_{dc} - T_{sw}) / T_{ctrl} \rfloor$; 当 $T_{sf} < 2T_{dc} - T_{sw} + T_{cs}$ 时, 导致 CC 饱和的主要原因是数据传输与下一帧发生频谱冲突, 可得 $M_{S2} = \lfloor (T_{sf} - T_{dc} - T_{cs}) / T_{ctrl} \rfloor$ 。

根据超帧、感知帧、控制帧和数据帧的时间约束关系, RA-MAC 的控制信道门限取决于 M_{S1} 和 M_{S2} 中的较小者, 即 $M_S = \min \{ M_{S1}, M_{S2} \}$ 。证毕

3.4 网络吞吐量性能

基于上述模型并参考文献[7]的方法, 分 CC 饱和与非饱和两种情况, 讨论协议的饱和吞吐量性能。

定理 2 RA-MAC 的饱和吞吐量为

$$S = \begin{cases} \frac{M_S E[P] V_{ctrl} (T_{sf} - T_{cs})}{(M_S + 1) T_{ctrl} T_{sf}}, & \text{CC饱和} \\ \frac{M_A E[P]}{(T_{cs} + T_{dc} + T_{ctrl} / V_{ctrl})}, & \text{CC非饱和} \end{cases} \quad (2)$$

证明 在 CNP 阶段, 成功传输的 CRTS/CCTS 对 CC 的占用率 $V_{ctrl} = P_s P_{tr} T_{ctrl} / [(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_{ctrl} + P_{tr} (1 - P_s) T_{col}]$, 其中, $P_s = [N\tau(1-\tau)^{N-1}] / [1 - (1-\tau)^N]$ 为 SU 在 CC 上成功发送 CRTS 的概率; $P_{tr} = 1 - (1-\tau)^N$ 为在一个时隙内至少有一个 SU 发送 CRTS 的概率; σ 为单位时隙长度; $T_{col} = T_{crts} + T_{SIFS}$ 为发生冲突的控制分组所占用信道的的时间。

在 $(M_S + 1) T_{ctrl} / V_{ctrl}$ 时间内, 信道上传输的有效

数据量为 $E[P]$ ，则工作中数据信道的吞吐率为 $U_{CH} = E[P] V_{ctrl} / [(M_S + 1) T_{ctrl}]$ 。

当 $M_S \leq M_A$ 时，CC 为饱和态，总有数据信道处于空闲态，只要 CRTS 发送成功，就能成功分配到数据信道用于数据传输。在 CC 上，通过 CRTS/CCTS 握手实现信道预约的输出速率决定了网络的饱和吞吐量，即 $S_{sat} = M_S U_{CH} (T_{sf} - T_{cs}) / T_{sf}$ 。

当 $M_S > M_A$ 时，CC 为非饱和态，无空闲的数据信道，CRTS 即使发送成功，也不保证数据信道协商能成功。在 CC 上可实现足够次数的 CRTS/CCTS 交互，使数据信道上始终有通信数据。网络的饱和吞吐量取决于数据信道的传输速率，即 $S_{unsat} = [M_A E[P]] / [T_{cs} + T_{dc} + T_{ctrl} / V_{ctrl}]$ 。证毕

4 数值计算与仿真分析

通过数值分析和 NS2 仿真，验证所提模型的有效性，讨论不同参数与协议性能的关系。在 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 的矩形区域内，随机分布 $Q=4$ 个 PU 和 $N=2 \sim 72$ 个 SU，每个信道的传输速率为 512 kbit/s 。SU 之间的传输采用 CBR 数据流，分组大小为 $E[P]=1024 \text{ Byte}$ 。仿真中使用的其它默认参数如下： $W_0=32$ ， $R=5$ ， $T_{SIFS}=10 \mu\text{s}$ ， $T_{DIFS}=50 \mu\text{s}$ ， $T_{sw}=10 \mu\text{s}$ ， $T_{sf}=200 \text{ ms}$ ， $T_{cs}=10 \text{ ms}$ 。

4.1 模型的有效性和可靠性验证

通过将计算模型求得的控制信道门限理论值与网络仿真获取的实际门限值进行比较来验证模型的有效性。采用默认参数进行数值分析，因 $T_{sf} \geq 2T_{dc} - T_{sw} + T_{cs}$ ，由定理 2 可得门限的理论值 $M_S = 7$ 。在认知用户数量 N 不同的情况下，吞吐量随稳态可用授权信道数 M_A 变化的曲线，如图 4 所示。随 M_A 的增加，吞吐量均呈现出先逐渐增长，达到一定数值后保持稳定的现象。这是由于当 $M_A < 7$ 时，网络中的稳态可用授权信道较少，增加的空闲信道可供 SU 使用，使得吞吐量不断增加；当 $M_A = 7$ 时，吞

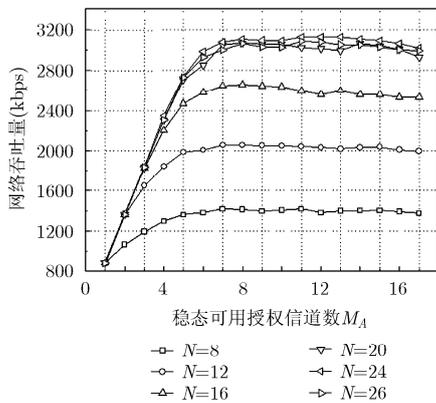


图 4 控制信道门限仿真验证

吐量达到峰值；当 $M_A > 7$ 时，更多空闲信道也无法充分利用，CC 达到饱和，即可得到门限的实际值为 7。综上所述，控制信道门限的理论值与仿真值相吻合，所提出的控制信道门限模型是有效的。

选取不同数据分组大小 $E[P]$ 和超帧时长 T_{sf} 重复上述验证过程。如图 5 所示，在不同参数组合下，门限的理论值和仿真结果基本保持一致，表明所提模型具有较好的可靠性。 M_S 与 $E[P]$ 、 T_{sf} 的变化关系还表明，当其它参数一定时， T_{sf} 越大可以获得越高的 M_S ；当 T_{sf} 一定时，增加 $E[P]$ 可以提高 M_S ，但 M_S 改善到一定程度后，继续增加 $E[P]$ 反而会降低 M_S ，甚至恶化为不可用。这是由于在曲线的上升段，决定 M_S 的主要因素是防止出现可重用的数据信道，增加 $E[P]$ 可以减少可重用数据信道出现的概率，有利于 M_S 的提高；在曲线的下降段，决定 M_S 的主要因素是避免数据传输与下一帧发生冲突，过大的 $E[P]$ 反而容易造成单个数据报文的信道占用时间超过 T_{sf} 的限制，不利于 M_S 的提高。实际中为避免 SU 对 PU 的干扰， T_{sf} 的取值会存在上限， M_S 存在理论上的最优上限。因此，在具体设计 RA-MAC 协议时， $E[P]$ 和 T_{sf} 等参数的选取应进行折中优化。

4.2 网络参数与协议性能的数值关系分析

随着认知用户数 N 、稳态可用授权信道数 M_A 的变化，CC 非饱和与饱和情况下协议吞吐量的理论值和仿真值的比较结果，分别如图 6，图 7 所示。图中吞吐量的理论值与仿真值基本保持一致，表明分析方法和推导结论是正确和有效的。

如图 6 所示，当 N 一定时，随着 M_A 的增加，吞吐量有明显提高。这是由于当 CC 非饱和时， M_A 的增大意味着 SU 可以实际使用的数据信道增加，信道协商失败的概率降低，信道有效利用率不断提高，因而，吞吐量会呈现较明显的增加趋势。当 M_A 一定时，随着 N 的增加，吞吐量缓慢下降。这是由

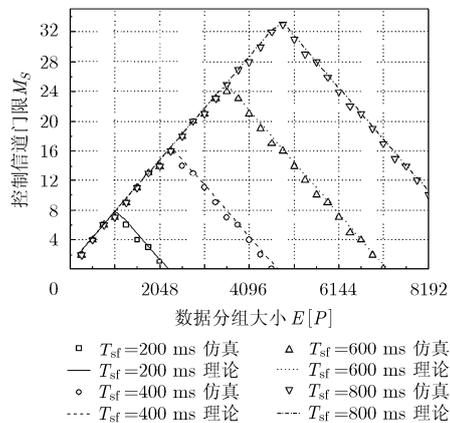


图 5 控制信道门限理论值与仿真结果比较

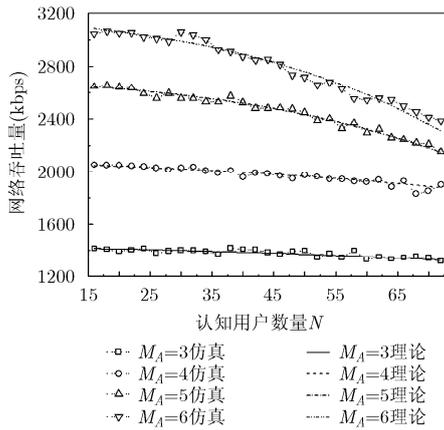


图6 CC 非饱和时协议吞吐量与网络参数的关系

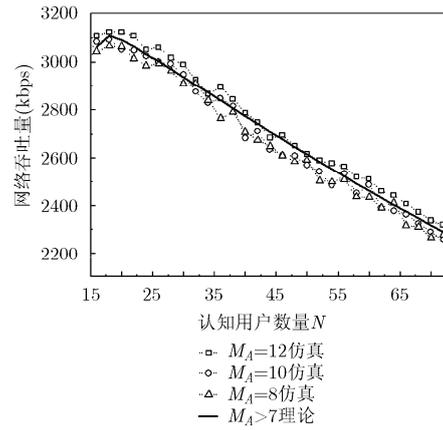


图7 CC 饱和时协议吞吐量与网络参数的关系

于 SU 的增加, 虽然会增大用户间信道协商的碰撞概率, 但鉴于 CC 协商能力存在冗余, 对信道利用率的影响较小, 因而, 吞吐量仅出现较平缓的下降。

如图 7 所示, 当 N 一定时, 随着 M_A 的增加, 吞吐量变化很小。这是由于当 CC 饱和时, SU 能够通过信道协商实际使用的信道数已达到能力上限, 即使 M_A 继续增长也无法被 SU 有效利用, 因而, 吞吐量会维持基本稳定。当 M_A 一定时, 随着 N 的增加, 吞吐量出现明显下降。这是由于 CC 饱和后, N 越大, 信道协商发生冲突的概率越大, 信道的利用率降低, 造成吞吐量不断降低。

综上所述, 对于 RA-MAC 协议, 由于控制信道门限的存在, CC 达到饱和后, 增加更多的数据信道对吞吐量性能的提升非常有限。因此, RA-MAC 更适于用户分布密度较小的 CRN 环境。

5 结束语

针对 RA-MAC 协议, 本文提出了一种基于马尔科夫理论的分析方案。通过引入授权信道限制率和稳态可用授权信道数的概念, 解决了信道状态时变条件下信道可用性的度量问题。通过分析控制信道门限和信道协商过程, 给出了协议的理论吞吐量。仿真验证了本文方法的有效性, 并讨论了不同参数对协议性能的影响, 给出了协议设计的若干建议。

参考文献

- [1] Wang Bei-bei and Liu K. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1): 5-23.
- [2] De Domenico A, Strinati E, and Di Benedetto M. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(1): 21-44.
- [3] Zhang Xi and Su Hang. CREAM-MAC: cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol over dynamic

spectrum access networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1): 110-123.

- [4] IEEE 802.22-2011. Standard for Cognitive Wireless Regional Area Networks (RAN) for Operation in TV Bands [S]. 2011.
- [5] Hu Wen-dong, Willkomm D, Abusubaih M, et al. Dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(5): 80-87.
- [6] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- [7] 李红艳, 李建东, 曹勇. 基于 IEEE 802.11 的多信道多址接入协议性能分析[J]. *电子学报*, 2009, 37(4): 905-908.
Li Hong-yan, Li Jian-dong, and Cao Yong. Performance analysis of a multi-channel MAC protocol based on IEEE 802.11 wireless LAN[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 905-908.
- [8] Luo Tie, Motani M, and Srinivasan V. Cooperative asynchronous multi-channel MAC: design, analysis, and implementation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(3): 338-352.
- [9] Tumuluru V, Wang P, and Niyato D. Channel status prediction for cognitive radio networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2012, 12(10): 862-874.

王晓飞: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为认知无线网络、通信网络安全等。

张希: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为延迟容忍网络等。

张权: 男, 1974 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为信息安全、量子通信等。

唐朝京: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信系统基础理论、通信网信息安全与对抗等。