

## IEEE 802.11e EDCA 协议吞吐率性能分析模型\*

王心源<sup>1,2</sup>,程鹏<sup>1</sup>,吴斌<sup>2</sup>

(1.中国科学院微电子研究所,北京 100029;2.中国科学院大学 微电子学院,北京 100049)

**摘要:**对 IEEE 802.11e 增强的分布式控制接入协议进行了详细分析,对比分布式协调功能 DCF 与增强的分布式控制接入 EDCA 之间的差别,提出了一种四维马尔科夫链模型,该模型将饱和条件情况和非饱和条件情况进行统一。该模型不仅考虑了退避计时器冻结状态、发送冲突状态、最大重传次数,还充分考虑了不同接入优先级流的内部冲突和 TXOP 传输。相比于二维马尔科夫链模型,该模型可以准确预测 EDCA 中不同优先级接入流的吞吐率。最后利用仿真软件,验证了饱和条件下该模型的正确性。

**关键词:** IEEE 802.11e;增强的分布式控制接入;马尔科夫链模型

中图分类号: TN925.93

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211537

中文引用格式: 王心源,程鹏,吴斌. IEEE 802.11e EDCA 协议吞吐率性能分析模型[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 115-118, 123.

英文引用格式: Wang Xinyuan, Cheng Peng, Wu Bin. Throughput performance analysis model for IEEE 802.11e EDCA protocol[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 115-118, 123.

## Throughput performance analysis model for IEEE 802.11e EDCA protocol

Wang Xinyuan<sup>1,2</sup>, Cheng Peng<sup>1</sup>, Wu Bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper analyzes the IEEE 802.11e enhanced distributed control access protocol in detail, compares the difference between the distributed coordination function DCF and the enhanced distributed control access EDCA, and proposes a four-dimensional Markov chain model. The model unifies the saturated condition and the unsaturated condition. This model not only considers the freeze state of the backoff timer, the transmission conflict state and the maximum number of retransmissions, but also fully considers the internal conflicts and TXOP transmissions of different access priority streams. Compared with the two-dimensional Markov chain model, this model can accurately predict the throughput of access flows with different priorities in EDCA. At last, simulation software is used to verify the correctness of the model under saturation conditions.

**Key words:** IEEE 802.11e; EDCA; Markov chain model

## 0 引言

目前很多学者对 IEEE 802.11 协议的性能进行理论分析,其中最为著名的当属学者 Bianchi<sup>[1]</sup>利用马尔可夫链模型对分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)进行建模。文献[2]通过改进二维马尔可夫链模型对饱和条件下的吞吐率和分组延时进行分析,并以此作为基础给出了不同节点数下基本接入模式和请求发送/确认发送模式切换门限阈值。文献[3]将饱和和非饱和的 DCF 模型统一,且考虑了退避计数器冻结和重传次数,使二维马尔可夫链模型更为精确和统一。

DCF 模型中对数据包进行统一处理,无法保障服务质量(Quality of Service, QoS),因此 802.11e 协议被引进<sup>[4]</sup>。

802.11e 协议提出了一种增强的分布式控制接入(Enhanced Distributed Control Access, EDCA)协议。EDCA 引入多个队列承接不同业务的数据包,队列参数的差异使得不同的业务产生优先级,保障 QoS 特性<sup>[5-6]</sup>。文献[7]分析了数据流和语音流同时存在情况下语音流的吞吐率性能。

本文通过增加马尔科夫链模型的维度,对 EDCA 进行建模,综合考虑数据包的优先级产生的内部冲突以及增加多个状态周期,使得该模型更加完整精确。

## 1 增强的分布式控制接入模型

由于 DCF 和 PCF 无法满足 QoS 需求,因此 802.11e 协议引入了 EDCA 机制<sup>[8-10]</sup>。

## 1.1 增强的分布式控制接入

EDCA 包含 4 种接入级别(Access Category, AC),每个 AC 由一组特定的接入参数定义。

\* 基金项目:“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项(2012ZX-03004-004)

如表 1 所示,EDCA 中定义 4 种 AC 优先级。不同 AC 具有不同的最小竞争窗口 CW<sub>min</sub>、最大竞争窗口 CW<sub>max</sub>、仲裁时间(Arbiration Inter-Frame Space, AIFS)和传输时间 TXOP limit。

表 1 EDCA 默认接入参数

| AC    | CW <sub>min</sub> | CW <sub>max</sub> | AIFSN | TXOP limit/ms |
|-------|-------------------|-------------------|-------|---------------|
| AC_BK | 15                | 1023              | 7     | 0             |
| AC_BE | 15                | 1023              | 3     | 0             |
| AC_VI | 7                 | 15                | 2     | 3.008         |
| AC_VO | 3                 | 7                 | 2     | 1.504         |

从图 1 所示的 802.11e EDCA 的接入时序图可以看出传统站点(Station, STA)不对数据进行区分,而 QoS STA 对不同的 AC 进行区别处理,优先级高的退避时间更短<sup>[11]</sup>。

不同数据在内部虚拟竞争,竞争获胜后再与网络中其他 STA 进行竞争接入。竞争获胜的 STA 将获得 TXOP limit 时间的传输时间,属于无竞争阶段<sup>[12-13]</sup>。

1.2 四维的 EDCA 马尔科夫链模型

EDCA 机制主要通过 AIFS、CW<sub>min</sub>、CW<sub>max</sub>、TXOP 参数来保证不同数据流的优先级。

不同 AC 在接入前需要等待不同信道空闲时间 AIFS 时间,此阶段称之为 AIFS 阶段<sup>[14-15]</sup>。AIFS 阶段完成后进入到退避阶段(Backoff 阶段),若信道繁忙退避计数器锁定,进入计数器冻结阶段(Frozen 阶段)。退避计数器的值为 0,进行传输。若内部不存在更高优先级 AC 同时传输,且外部 STA 也没有同时传输,该 AC 流进入传输阶段(Transmission 阶段),此阶段需要考虑不同 AC 的 TXOP 以及聚合长度因素带来的传输时间的差异。传输完成后若仍有数据需要传输则进入 AIFS 阶段,若队列中无数据传输则进入空闲阶段(IDLE 阶段)。若由于内部

更高优先级 AC 传输或外部 STA 传输造成冲突,进入到冲突阶段(Collision 阶段),经过冲突阶段后进入重传阶段,重传阶段仍然需要经历退避。若重传次数达到最大传输次数  $m$  后仍传输失败,则将数据包丢弃。

根据 EDCA 机制建立四维马尔可夫链模型,如图 2 和图 3 所示。四维  $(i, j, k, d)$  分别为状态、重传次数、退避计数以及此状态剩余停留时间。状态转移概率如图中标注,  $P_b$  为信道繁忙的概率,  $P_c$  为冲突概率。  $[T_s]$  为平均成功传输时间,  $[T_c]$  为平均冲突时间,  $[A]$  为不同 AC 的 AIFS 时长,  $[N]$  为平均冻结时间,  $m$  为重传次数,  $W_j$  为第  $j$  次重传时的竞争窗口。

为了使该模型适用于非饱和条件,增加了队列空闲 IDLE 状态,状态概率为  $P_{IDLE}$ 。  $q$  为节点从空闲状态进入信道监测 AIFS 阶段的状态转移概率,节点进入 IDLE 状态的概率为  $\eta$ 。

$P_{i,j,k,d}$  为  $(i, j, k, d)$  的稳定状态概率,本文提出的模型的稳定状态概率可由以下方程组求解:

$$P_{B,j,0,0} = P_c^j P_{B,0,0,0} \quad 0 \leq j \leq m \quad (1)$$

$$P_{B,j,k,k} = \frac{W_j - k + 1}{W_j + 1} \frac{P_{B,j,0,0}}{1 - P_b} \quad 0 \leq j \leq m - 1, 1 \leq k \leq W_j \quad (2)$$

$$P_{c,j,0,d} = P_c P_{B,j,0,0} \quad 0 \leq j \leq m - 1, 1 \leq d \leq [T_c] \quad (3)$$

$$P_{F,j,k,d} = \frac{W_j - k + 1}{W_j + 1} \frac{P_b}{1 - P_b} P_{B,j,0,0} \quad 0 \leq j \leq m, 1 \leq d \leq [N] \quad (4)$$

$$P_{A,j,k,d} = \frac{W_j - k + 1}{W_j + 1} \frac{P_b}{(1 - P_b)^{d+1}} P_{B,j,0,0} \quad 0 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq W_j, 1 \leq d \leq [A] \quad (5)$$

$$P_{A,0,0,d} = \frac{1}{(1 - P_b)^d} P_{B,0,0,0} \quad 1 \leq d \leq [A] \quad (6)$$

$$P_{T,0,0,d} = (1 - P_c^{m+1}) P_{B,0,0,0} \quad 1 \leq d \leq [T_s] \quad (7)$$

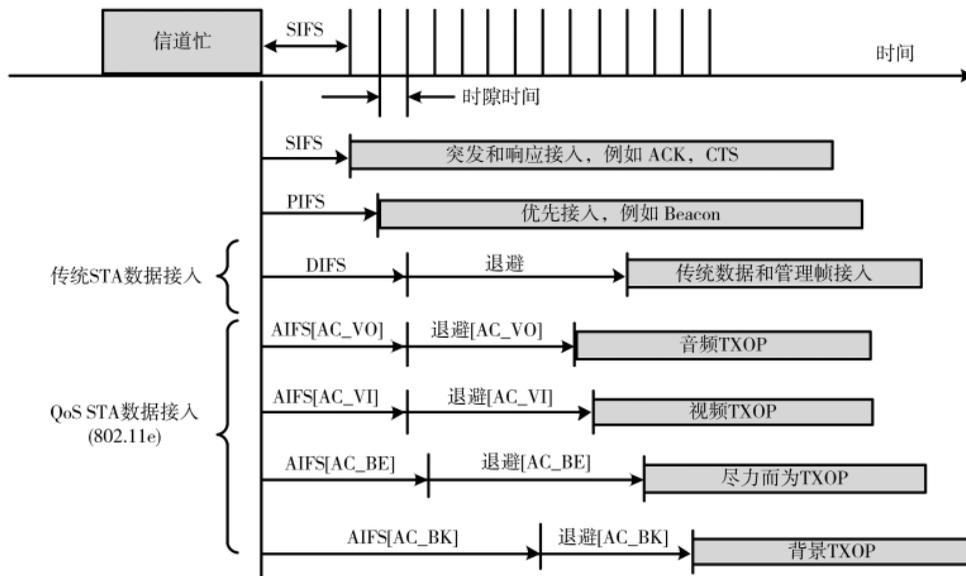


图 1 802.11 EDCA 接入时序图

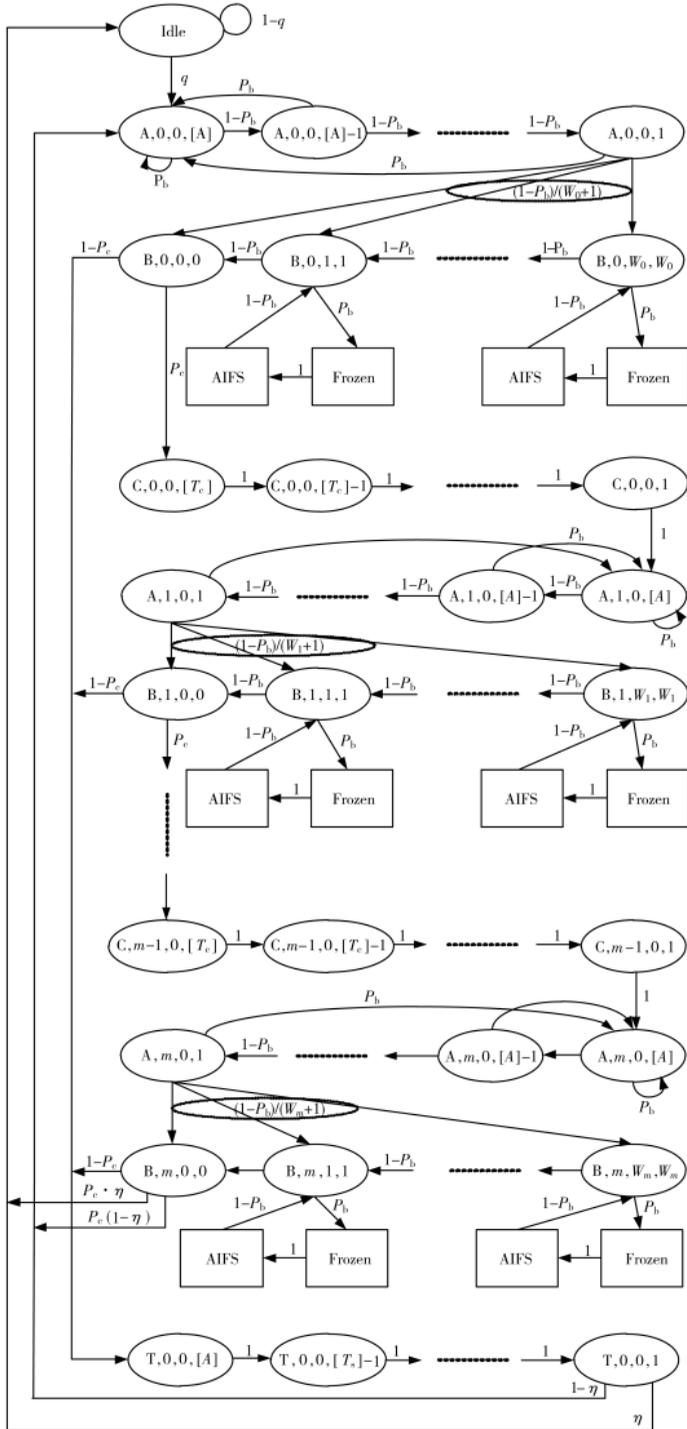


图2 EDCA 马尔科夫链模型

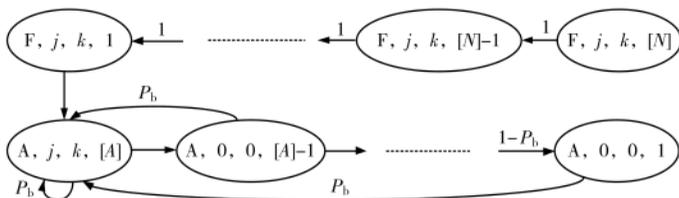


图3 EDCA 冻结阶段和信道检测阶段

$$P_{IDLE} = \eta P_c P_{B,m,0,0} + \eta P_{T,0,0,1} + (1-q) P_{IDLE} \quad (8)$$

$$\sum_{i,j,k,d} P_{i,j,k,d} + P_{IDLE} = 1 \quad (9)$$

将上述方程联立求解  $P_{B,0,0,0}$ :

$$P_{B,0,0,0} = \left[ \frac{1}{P_b} \left( \frac{1}{(1-P_b)^{[A]}} - 1 \right) + (1-P_c^{m+1}) \left( [T_s] + \frac{1}{1-P_c} \right) \right]^{-1} + P_b \frac{(1-P_c^m)}{(1-P_c)} [T_c] + \frac{1}{2(1-P_b)} \left( [N]P_b + \frac{1}{(1-P_b)^{[A]}} \right) \sum_{j=0}^m P_c^j W_j + \frac{\eta}{q} \quad (10)$$

因为  $[T_s]$ 、 $[T_c]$ 、 $[A]$ 、 $[N]$ 、 $m$ 、 $W_j$  已知,假设  $\eta$  和  $q$  为常数,所以只需求得  $P_b$  和  $P_c$  就可求解出各个状态的概率。 $P_b$  和  $P_c$  不仅与 STA 内部的其他 AC 有关,还与外部 STA 的状态有关。

以往学者对 DCF 建立模型时对每个时隙 STA 接入信道的概率计算不区分不同能级的 AC,只简单地对 Backoff 阶段计数器为 0 的概率求和,对于冲突也只考虑不同 STA 竞争信道产生的冲突。本文将冲突分为内部冲突和外部冲突,内部冲突由 EDCA 虚拟竞争导致,外部冲突由不同 STA 竞争信道导致,综合考虑内外部冲突可以精确计算不同 AC 的性能。AC<sub>i</sub> 在一个时隙内可能传输的概率为  $\tau_i$ ,STA 至少有一个 AC 要传输的概率为  $\tau$ 。

$$\tau_i = \sum_{j=0}^m P_{B,j,0,0} = \frac{1-P_{ci}^{m+1}}{1-P_{ci}} P_{B,0,0,0} \quad 0 \leq i \leq 3 \quad (11)$$

$$\tau = 1 - \prod_{i=0}^3 (1-\tau_i) \quad (12)$$

根据 802.11e 协议,当有不同优先级的 AC 同时要传输时,进行内部虚拟竞争,当低优先级和高优先级的 AC 同时传输时,低优先级由于冲突传输失败。AC<sub>i</sub> 内部冲突概率  $P_{cint_i}$  为:

$$P_{cint_i} = 1 - \prod_{i>j} (1-\tau_j) \quad (13)$$

网络中存在  $M$  个 STA 时,只有一个 STA 进行数据传输不产生外部冲突,同时有多个 STA 传输时产生外部冲突,外部冲突的概率为  $P_{cest_i}$ ,AC 的总冲突概率为  $P_{ci}$ 。信道被一种 AC 占据的概率为  $v_i$ 。

$$P_{cest_i} = 1 - (1-\tau)^M \quad (14)$$

$$P_{ci} = 1 - (1-P_{cint_i})(1-P_{cest_i}) \quad (15)$$

$$v_i = [T_s] P_{T,0,0,d} + [T_c] P_{cest_i} \sum_{j=0}^{m-1} P_{c,j,0,d} \quad (16)$$

信道被一个 STA 占据的概率  $v$  等于只有一种 AC 占据信道的概率。

$$v = \sum_{i=0}^3 v_i \prod_{j \neq i} (1-v_j) \quad (17)$$

至少有一个 STA 占据信道时,信道状态为忙,所以求得信道繁忙的概率  $P_b$  为:

$$P_b = 1 - (1-v)^M \quad (18)$$

联立方程(1)到方程(18),可以求解任意状态下的概率。

1.3 吞吐率分析

本文所建立的模型可以单独计算某个 AC 的吞吐率以及 AP 的吞吐率。在网络中只有一个站点在传输时才能传输成功,对于某一 AC 来讲,只有一个站点传输且优先级高于该 AC 的数据流不传输时,此 AC 才能够成功传输。所以 AC<sub>i</sub> 传输成功的概率 P<sub>si</sub> 为:

$$P_{si} = MP_{ii}(1-v)^{M-1} \prod_{j<i} (1-v_j) \tag{19}$$

$$P_{ii} = \sum_{d=1}^{[T_i]} P_{T,0,0,d} \tag{20}$$

当 AC 开启 TXOP 时,AC 成功竞争到新到后在 TXOP limit 时间内一直传输;若不开启 TXOP,AC 成功竞争到信道后只传输一个数据包,然后再次竞争信道。所以传输数据包数 N<sub>transi</sub> 为:

$$N_{transi} = \begin{cases} 1 & TXOPlimit=0 \\ \left\lfloor \frac{TXOPlimit}{T_{s1}+SIFS} \right\rfloor & TXOPlimit \neq 0 \end{cases} \tag{21}$$

其中, T<sub>s1</sub> 为传输一个数据包的时长, AC<sub>i</sub> 的传输时间为 T<sub>si</sub>:

$$T_{si} = N_{transi}(T_{s1}+SIFS) \tag{22}$$

$$T_{s1} = P + \delta + SIFS + ACK + \delta \tag{23}$$

$$T_c = P + \delta + SIFS + ACK\_Timeout \tag{24}$$

其中, P 代表数据包传输时间 δ 为传输延时,所以 AC<sub>i</sub> 的吞吐率 S<sub>i</sub> 为:

$$S_i = \frac{P_{si} E[P] N_{transi}}{(1-P_b)\sigma + P_b \sum_{j=0}^3 P_{sj} T_{sj} + P_b \left(1 - \sum_{j=0}^3 P_{sj}\right) T_c} \tag{25}$$

其中, E[P] 为平均数据包包长, σ 为信道空闲时长。AP 的吞吐率 S<sub>AP</sub> 为:

$$S_{AP} = \sum_{i=0}^3 S_i \tag{26}$$

2 模型仿真验证

本文利用 NS-3 开源网络模拟器模型进行验证。

2.1 802.11n

仿真条件为 802.11n 协议, 2.4 GHz 频段, 20 MHz 带宽, 最大空间流数为 2, A-MSDU、A-MPDU 长度都为 0。

不使用 TXOP 时的饱和吞吐量如图 4 所示。当不使用 TXOP 时,所有 AC 的 TXOP limit 均为 0。

使用 TXOP 时的饱和吞吐率如图 5 所示。当使用 TXOP 时, AC\_VO 和 AC\_VI 的 TXOP limit 分别为 1.504 ms 和 3.008 ms。

由图 4 和图 5 可以看出,在不启用 TXOP 时,4 种 AC 的吞吐率差异较大。当开启 TXOP 后, AC\_VO 和 AC\_VI 的吞吐率相差较小, AC\_VO 的优先级虽然高于 AC\_VI,但是 AC\_VI 的 TXOP limit 为 3.008 ms,是 AC\_VO 的 2 倍,所以一旦 AC\_VI 获得传输机会就可传输较多的数据。开

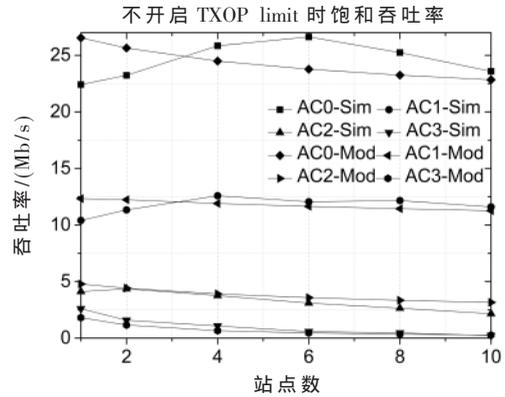


图 4 不同接入流的饱和吞吐率

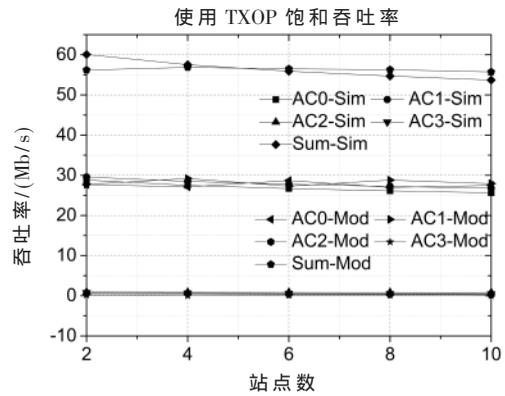


图 5 开启 TXOP 后不同接入流的饱和吞吐率

启 TXOP 后 AC\_BE 和 AC\_BK 的传输机会几乎为 0,所以吞吐率接近为 0。本模型能够适用于开启 TXOP 和关闭 TXOP 的两种情况。

2.2 802.11ac

仿真条件设置为 802.11ac 协议, 80 MHz 带宽, 最大空间流数为 2。802.11ac 中 A-MPDU 帧的最大长度限制为 1 024 Kb/s, A-MPDU 帧中包含更多的 MPDU 子帧,对应模型中的 E[P] 更大。

不使用 TXOP 和 A-MPDU 聚合的饱和吞吐率如图 6 所示。802.11ac 协议的物理层速更高,吞吐率更大。

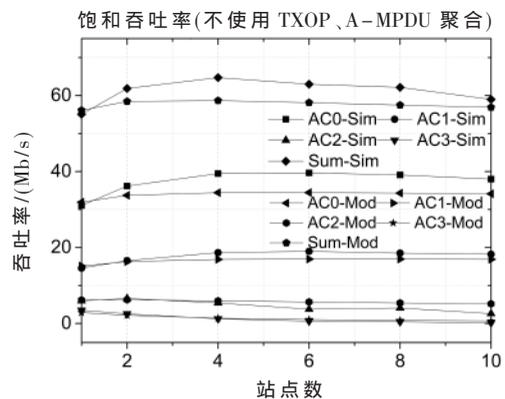


图 6 802.11ac 不同接入流的饱和吞吐率

(下转第 123 页)

法研究[J].软件学报,2009,20(6):1470-1486.

[9] 袁敏,黄志球,胡军.跨组织多业务事务建模与验证方法[J].软件学报,2012,23(3):517-538.

[10] 代飞,陈凤强,莫启,等.一种保持编排与参与者间行为一致的映射方法[J].软件学报,2018,29(5):1451-1470.

[11] OUEDERNI M, SALAÜN G, BULTAN T. Compatibility checking for asynchronously communicating software[C]// Proceedings of the International Workshop on Formal Aspects

of Component Software(FACS 2013), LNCS, Springer, 2013, 8348:310-328.

[12] 吴哲辉.Petri网导论[M].北京:机械工业出版社,2006.

[13] THOMAS F, MARTIN S. WoPeD - an educational tool for workflow net[C]// Proceedings of the BPM Demo Sessions, Eindhoven/The Netherlands, September, 2014:31-35.

(下转第128页)

(上接第118页)

使用TXOP时的吞吐率如图7所示。开启TXOP后AC\_VO和AC\_VI获得更大的传输机会,吞吐率明显提升。

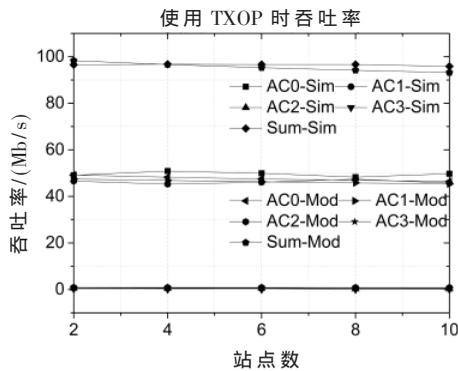


图7 开启TXOP后802.11ac不同接入流的饱和吞吐量

使用A-MPDU时的饱和吞吐率如图8所示。开启聚合后每次传输的数据包更大,吞吐率提升明显。

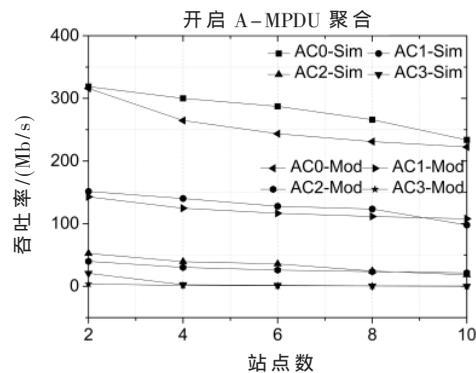


图8 使用A-MPDU聚合时的饱和吞吐量

### 3 结论

本文针对IEEE 802.11e协议EDCA机制建立四维马尔科夫链模型,该模型可以计算不同AC的吞吐率,可适用饱和状态和非饱和条件,支持TXOP机制。最后利用NS-3网络仿真工具对饱和和数据情况下模型的正确性进行了验证。

#### 参考文献

[1] BIANCHI G, TINNIRELLO I. Remarks on IEEE 802.11 DCF

performance analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8):765-767.

[2] 高峰,高泽华,文柳,等.IEEE 802.11a DCF协议吞吐量与时延性能分析[J].北京邮电大学学报,2010,33(6):43-47.

[3] 钟萍,施海彬,庄玉祥,等.IEEE 802.11 DCF协议性能分析模型[J].应用科学学报,2013,31(1):41-47.

[4] 陈涛,胡园园,王颖.WiFi关键技术与产品演进研究[J].软件导刊,2020,19(3):215-219.

[5] 何明泰,李可,刘恒.密集WiFi网络环境网络分配矢量优化与性能分析[J].电子技术应用,2017,43(9):106-110.

[6] 朱林杰.802.11ac Gbps WLAN芯片MAC层关键技术研究[D].北京:中国科学院大学,2019.

[7] CAI L X, LING X, SHEN X, et al. Supporting voice and video applications over IEEE 802.11n WLANs[J]. Wireless Networks, 2009, 15(4):443-454.

[8] 王鹭.IEEE 802.11e的EDCA机制及其改进算法研究[D].重庆:重庆大学,2013.

[9] 刘文.基于IEEE 802.11无线局域网QoS机制的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.

[10] 侯丽俊.无线局域网MAC层帧聚合技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.

[11] 尹春雷.基于WLAN的视频流传输研究[D].成都:电子科技大学,2011.

[12] 彭勃.下一代无线局域网EDCA关键技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2015.

[13] 周玉滨.影响WiFi速度六大因素[J].计算机与网络,2014,40(21):38.

[14] 徐景,杜金玲,杨旸.LTE和Wi-Fi系统间灵活频谱使用关键技术[J].中兴通讯技术,2015,21(1):43-46.

[15] 何源,郑霄龙.2.4GHz无线网络共存技术研究进展[J].计算机研究与发展,2016,53(1):26-37.

(收稿日期:2021-03-20)

#### 作者简介:

王心源(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:无线通信网络。

程鹏(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:嵌入式系统。

吴斌(1976-),男,博士,研究员,主要研究方向:无线通信芯片及系统应用。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所