

因此,非饱和和工作站点的平均服务时长 D 可由成功传输过程中所消耗的加权均值时间与因重传次数达到最大重传次数限制且重传失败所花费的加权均值时间相叠加组成:

$$D = \sum_{i=0}^m (T_s + iT_e + T_{backoff}(i)) p^i (1-p) + p^{m+1} (T_e(m+1) + T_{backoff}(m)) \quad (33)$$

3.4 系统吞吐量

定义归一化的系统吞吐量 TH(throughput)为任意单位时隙内任意站点发送的有效数据载荷 $E[d]$ 与任意时隙的时隙均值 $E[s]$ 的比值.吞吐量与节点数关系如图 2 所示.

$$TH = \frac{E[d]}{E[s]} = \frac{Ldata(P_s + P'_s)}{T_0 P_0 + T_s(P_s + P'_s) + T_e(1 - P_0 - P_s - P'_s)} \quad (34)$$

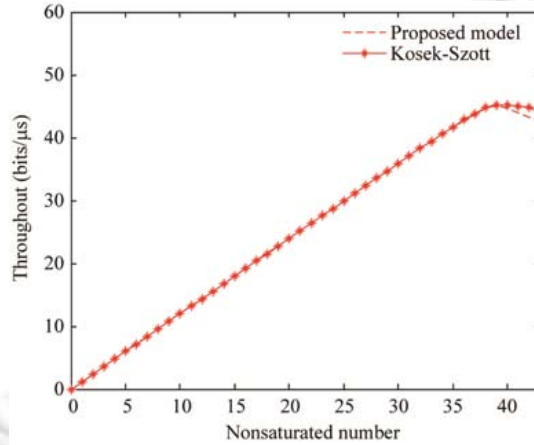


Fig.2 Throughput and number of nodes

图 2 吞吐量与节点数关系

3.5 平均传输时延

定义平均传输时延为从站点进入退避过程开始,到成功收到接收站点回复的 ACK 确认帧,确认数据成功传输为止,为数据的传输时延,即一次成功的数据通信所消耗的平均时间.与式(33)相似,可以分别归纳出非饱和和站点及饱和站点的平均传输时延:

$$E[D] = \sum_{i=0}^m (T_s + iT_e + T_{backoff}(i)) p^i (1-p) \quad (35)$$

$$E[D'] = \sum_{i=0}^m (T_s + iT_e + T'_{backoff}(i)) p'^i (1-p') \quad (36)$$

其中, $Es' = T_0 + T_s P'_{sl} + T_e(1 - P'_{sl} - P'_{ol})$, $T'_{backoff}(i) = Es' \sum_{j=0}^i \frac{W_j - 1}{2}$.

3.6 传输丢包率

由于数据到达率服从泊松分布,且缓存状态与之前状态过于相关,故服务时长内缓存溢出丢包率的是极其复杂的,只考虑当前状态而不考虑之前状态是不准确的.因此本文只讨论给出了由于站点达到最大重传次数限制而丢包的传输丢包率,对于非饱和和工作站点及饱和和工作站点的传输丢包率可分别表示为

$$P_{drop} = p^{m+1} \quad (37)$$

$$P'_{drop} = p'^{m+1} \quad (38)$$

4 数值分析及仿真实现

仿真的参数来源于 IEEE 802.11ac^[2]协议的相关部分,见表 1.需要特别指出的是,在进行算法比较时,不同模型间的对比将采用包括但不限于对算法部分内容进行置零等方法,使提出的算法与对比算法在参数及变量上保持一致,以尽可能地消除不必要的干扰.

Table 1 Summary of IEEE 802.11ac parameters

表 1 IEEE 802.11ac DCF 参数设置

Parameter	Value	Parameter	Value
Payload(L_{data})	1 500(bytes)	σ	9(μ s)
PHY header	48(μ s)	δ	2(μ s)
MAC header	36(bytes)	R_b	24(Mbps)
ACK	14(bytes)	R_d	876.6(Mbps)
SIFS	16(μ s)	λ	$10e-4$ (packs/ μ s)
DIFS	34(μ s)	K	50
CW_{min}	31	Fading margin	0.05
CW_{max}	1 023	Channel frequency	5(GHz)
Retry limit m	7	Velocity	2(m/s)

本文提出的算法在图 2 中与 Kosek-Szott^[19]提出同样聚焦于异构混合成分网络的算法进行了对比.在仿真的过程中提出的算法在参数设置上与文献[19]完全相等,即不考虑最大重传次数大于最大窗口的阶数,不考虑误码率等情况.同样地,与文献[19]中讨论的方式相同,为了便于仿真以及增加多组对比,只对非饱和和工作模式下的 DCF 模型进行了分析比较.结合文献[19]中的相关成果,可以得出,在不饱和节点逐渐增多的过程中,由于传输碰撞概率的增加不饱和性减小而饱和概率增加,提出的算法结果优于文献[19]中的结果,更接近于 DCF 机制的实际吞吐量,这主要得益于概率归纳更准确以及服务时长考虑更完善.同时,在建模过程中,本文提出的算法对不饱和性的计算是通过概率的大小来表示的,故在算法实现的过程中,随着不饱和节点数或数据包到达率的增加可以自动同步计算新的不饱和性.而文献[19]中的算法由于其采用的是 $M/M/1/K$ 排队模型,且在不饱和性的处理上将其与单位时隙平均达到的数据包个数相同,因此,随着系统趋于饱和,需要计算不饱和模式与饱和模式之间的连接点并适时地利用饱和算法来计算饱和模式下的任意时隙有数据发送的概率.因此,这种算法相对提出的算法更加复杂,且文献[19]中数据包到达率被定义为服从泊松分布,因此,简单地用平均值来处理系统不饱和性的方法也是不太准确的.

在图 3 和图 4 中,提出的算法与两种只聚焦于同质网络成分的算法在相同参数条件下进行了仿真比较.

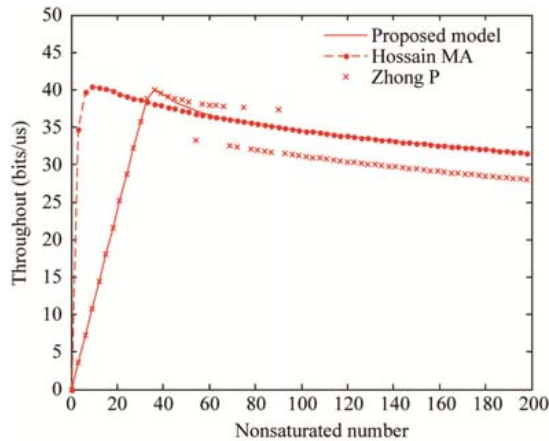


Fig.3 Throughput and number of nodes ($m > m'$)

图 3 吞吐量与节点数关系($m > m'$)

相较于 Hossain 等人^[11]提出的算法,由于本文充分考虑了数据排队等待的不同状态时长,分别给出了不同 q

值和 ρ 值,而文献[11]中简单地将二者等同,故而在系统进入饱和前,提出的算法对非饱和状态的结果处理得更好,与 Zhong 等人^[21]提出的算法仿真结果趋于一致,而文献[21]中的成果同样验证了这一结果是准确的.但是随着不饱和节点的增加,系统进入饱和状态,提出的算法与文献[11]中的算法仿真结果保持一致,反观文献[21],由于模型稳态求解的结果有误,以及对退避过程考虑不够全面,当 $m>m'$ 时,仿真结果出现剧烈的波动;当 $m=m'$ 时,3种算法仿真结果保持基本一致.

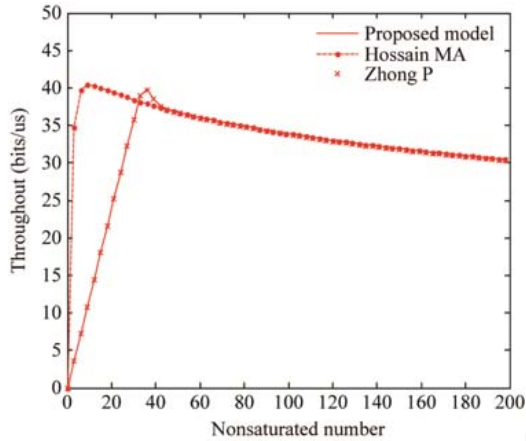


Fig.4 Throughput and number of nodes ($m=m'$)
图 4 吞吐量与节点数关系($m=m'$)

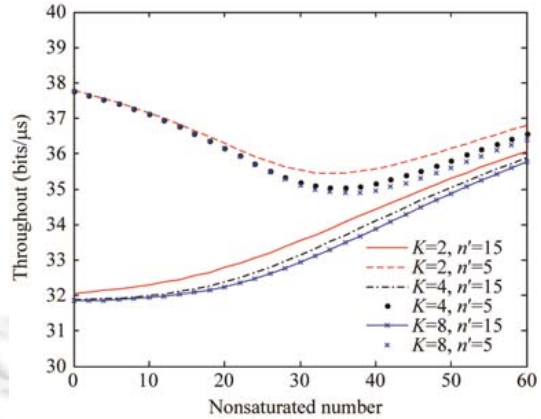


Fig.5 Throughput under heterogeneous traffic sources
图 5 异构业务下的吞吐量

因此,相较于文献[11,19,21]中的算法,本文提出的算法更加准确、全面,同时保持了相对的简单.故而能够更好地模拟与分析包括单一的同质网络业务成分和异构网络业务成分在内的 IEEE 802.11 DCF 机制的性能.

图 5~图 7 中利用提出的算法对异构网络业务进行了综合性仿真,分别给出了不同大小的缓存 K 值、饱和节点数 n' 随着不饱和节点数 n 的增长与系统吞吐量、传输时延及传输丢包率的关系.

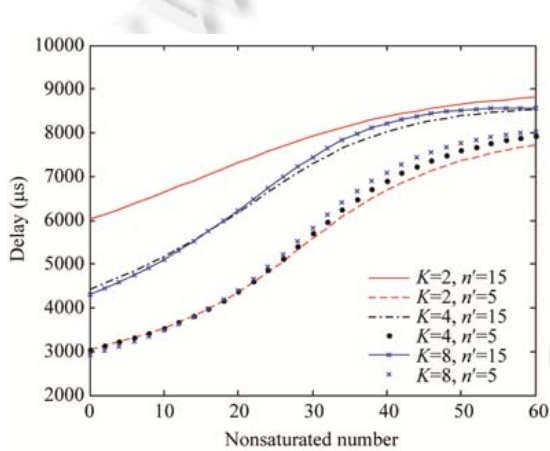


Fig.6 Delay under heterogeneous traffic sources

图 6 异构业务下的传输时延

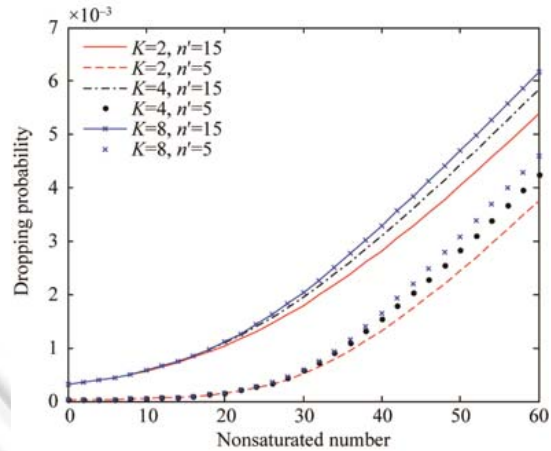


Fig.7 Dropping probability under heterogeneous traffic sources

图 7 异构业务下的传输丢包率

可以看出,当饱和节点数 n' 一定时,吞吐量会随着 K 值的增大而降低,这是由于 K 值的增加导致非饱和节点任意间隙发送几率随之增加,从而导致吞吐量一定程度的下降;同样地,传输时延将在一定程度和范围内出现增加.当 K 值一定时,随着饱和和节点数的增多,吞吐量由于系统过于饱和导致冲突可能性的激增,进而导致吞吐量的

减少,伴随着不饱和节点的增多,饱和性能被稀释,逐渐进入非饱和阶段,吞吐量重新进入增长期,直至进入新的饱和状态,再随节点数的增加而减少;同时,由于网络中节点数的增长,数据碰撞概率增加,传输时延跟随不饱和和节点数的增长而增加.对于传输丢包率,随着节点数的增加,传输丢包率趋于指数型增长.同时,随着 K 值的增加,丢包率也会出现轻微的增加.

5 结 语

本文提出了一种改进的全新混合 Markov 模型,详细分析了模型中的不同变量和概率,给出了相应的改进计算方法.结合 $M/G/1$ 排队模型,以及对有错信道的思考,全面考虑了 IEEE 802.11 DCF 机制中的退避冻结及重传限制等,在保持模型简单的同时,能够准确地分析缓存大小、节点数量、包到达率等关键问题与系统吞吐量以及时延的关系.通过仿真与分析可以得出,本文提出的算法模型与现有算法模型相比,不仅能够更好地对异构混合业务进行合理的建模、分析,而且更加准确、简单;同时,在单一业务的工作模式下(即将另一种业务的任意时隙的发送概率置零的情况下),本文提出的算法与 DCF 机制仍然保持了较好的一致性.

在接下来的工作中,将进一步完善相关模型,以及对文献[22]中提到的公平性等问题进行合理、有效的讨论,同时,聚焦于对新的随机接入方式 TF-R(trigger frame for random access)^[23]进行分析与研究.在提出的模型上,将 DCF 与 TF-R 接入方式进行联合建模,从而对 IEEE 802.11ac 与 802.11ax 混合模式场景下的性能进行有效的分析.

References:

- [1] IEEE Std. 802.11-2009. Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications.
- [2] IEEE Std. 802.11ac-2013. Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications.
- [3] Huang WY. Research on IEEE 802.11 MAC layer channel access technology [MS. Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [4] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000,18(3):535–547.
- [5] Mao JB, Mao YM, Leng P, Bai X. Research of the QoS-supporting IEEE 802.11 EDCA performance. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(4):750–770 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3490.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03490]
- [6] Yang WD, Ma JF, Li YH. Performance analysis based on packet arrival rate for the IEEE 802.11 DCF. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(10):2762–2769 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2762.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02762]
- [7] Kosek-Szott K, Natkaniec M, Pach AR. A simple but accurate throughput model for IEEE 802.11 EDCA in saturation and non-saturation conditions. *Computer Networks*, 2011,55(3):622–635. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.10.002]
- [8] Sharon O, Alpert Y. Comparison between TCP scheduling strategies in IEEE 802.11ac based wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 2017,61:95–113. [doi: 10.1016/j.adhoc.2017.02.009]
- [9] Sharon O, Alpert Y. Coupled IEEE 802.11ac and TCP performance evaluation in various aggregation schemes and access categories. *Computer Networks*, 2016,100(C):141–156. [doi: 10.1016/j.comnet.2016.02.023]
- [10] Yazid M, Bouallouche-Medjkoune L, Aissani D, Amrouche N, Bakli K. Analytical analysis of applying packet fragmentation mechanism on both basic and RTS/CTS access methods of the IEEE 802.11b DCF network under imperfect channel and finite load conditions. *Wireless Personal Communications*, 2014,77(1):477–506. [doi: 10.1007/s11277-013-1517-x]
- [11] Hossain MA, Sarkar NI, Gutierrez J, Liu W. Performance study of block ACK and reverse direction in IEEE 802.11n using a Markov chain model. *Journal of Network & Computer Applications*, 2017,78:170–179. [doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.029]
- [12] Zhao Q, Tsang DHK, Sakurai T. Modeling nonsaturated IEEE 802.11 DCF networks utilizing an arbitrary buffer size. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2011,10(9):1248–1263. [doi: 10.1109/TMC.2010.258]
- [13] Anna K, Bassiouni M. A new framework for QoS provisioning in WLANs using p-persistent 802.11 MAC. *Computer Communications*, 2008,31(17):4035–4048. [doi: 10.1016/j.comcom.2008.08.013]

- [14] Yazid M, Aïssani D, Bouallouche-Medjkoune L. Modeling and analysis of the TXOPLimit efficiency with the packet fragmentation in an IEEE 802.11e-EDCA network under noise-related losses. *Wireless Personal Communications*, 2016, 1–26. [doi: 10.1007/s11277-016-3863-y]
- [15] Patel P, Lobiyal DK. A simple but effective collision and error aware adaptive back-off mechanism to improve the performance of IEEE 802.11 DCF in error-prone environment. *Wireless Personal Communications*, 2015,83(2):1477–1518. [doi: 10.1007/s11277-015-2460-9]
- [16] Sun X, Gao Y. Distributed throughput optimization for heterogeneous IEEE 802.11 DCF networks. *Wireless Networks*, 2016, 1–11. [doi: 10.1007/s11277-016-1392-y]
- [17] Chen YB, Lin GY, Wei HY. A dynamic estimation of the unsaturated buffer in the IEEE 802.11 DCF network: A particle filter framework approach. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016, 1. [doi: 10.1109/TVT.2015.2456975]
- [18] Nguyen SH, Hai LV, Andrew LLH. Performance analysis of IEEE 802.11 WLANs with saturated and unsaturated sources. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012,61(1):333–345. [doi: 10.1109/j.TVT.2011.2174069]
- [19] Kosek-Szott K. A comprehensive analysis of IEEE 802.11 DCF heterogeneous traffic sources. *Ad Hoc Networks*, 2014,16(2): 165–181. [doi: 10.1016/j.adhoc.2013.12.008]
- [20] Szczypiorski K, Lubacz J. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF networks. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2008,9(10):1309–1317. [doi: 10.1631/jzus.A0720128]
- [21] Zhong P, Shi HB, Zhuang YX, Shi JH, Chen HH. Performance analysis Model for IEEE 802.11 distributed coordination function protocol. *Ying Yong Ke Xue Xue Bao/Journal of Applied Sciences*, 2013,31(1):41–47 (in Chinese with English abstract).
- [22] Omar HA, Abboud K, Cheng N, Malekshan KR, Gamage AT. A survey on high efficiency wireless local area networks: Next generation WiFi. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016,18(4):2315–2344. [doi: 10.1109/COMST.2016.2554098]
- [23] IEEE P802.11ax™/D1.0 draft standard for information technology—Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

附中文参考文献:

- [3] 黄文钰. IEEE 802.11 MAC 层信道接入技术的研究[硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [5] 毛建兵, 毛玉明, 冷鹏, 白翔. 支持 QoS 的 IEEE 802.11 EDCA 性能研究. *软件学报*, 2010, 21(4): 750–770. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3490.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03490]
- [6] 杨卫东, 马建峰, 李亚辉. 基于分组到达率的 802.11 DCF 性能分析. *软件学报*, 2008, 19(10): 2762–2769. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2762.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02762]
- [21] 钟萍, 施海彬, 庄玉祥, 石江宏, 陈辉煌. IEEE 802.11 DCF 协议性能分析模型. *应用科学学报*, 2013, 31(1): 41–47.

附录

附录中给出了文章中出现的重要变量的定义说明. 见表 A.

Table A
表 A

变量	定义
$(-1,0)$	不饱和和工作模式下站点等待数据进入缓存的状态
$b_{i,k}$	二维稳态分布函数
i/k	重传次数/目前状态所处状态的退避计数器值
CW_{\min}/CW_{\max}	最小/最大竞争窗口大小
W_i	第 i 次数据重传时竞争窗口的大小
K	站点的缓存大小
q	数据传输结束后站点缓存中有数据待传的概率
ρ	$(-1,0)$ 状态下有数据到达缓存的概率
λ	服从泊松分布的数据包到达率
p/p'	非饱和/饱和和工作模式下站点传输失败的概率
h/h'	非饱和/饱和和工作模式下站点受其他任意站点的传输状态引起的退避时隙冻结的概率
n/n'	非饱和/饱和和工作模式下的站点数

Table A (Continued)
表 A(续)

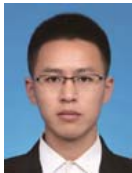
变量	定义
p_e	由帧传输错误而导致的传输失败的概率
P_{drop}/P'_{drop}	任意非饱和/饱和和工作模式下站点由于达到最大重传次数限制且传输失败而丢包的概率
P_s/P'_s	任意非饱和/饱和和工作模式下站点成功进行数据传输的概率
P_{st}/P'_{st}	一个非饱和/饱和和工作模式下站点侦听到其他站点有数据成功传输的概率
P_0	任意时隙不存在有站点进行数据传输的概率
P_{0l}/P'_{0l}	一个非饱和/饱和和工作模式下站点侦听到其他站点空闲无数据传输的概率
$T_0/T_s/T_e$	一个空闲时隙的大小/一次成功数据传输所需时间/一次失败数据传输所耗时间
D	非饱和和工作模式下站点一次数据传输周期的平均服务时长
$E[D]/E[D']$	非饱和/饱和和工作模式下站点的传输时延
L_{data}	一个数据包的有效载荷
TH	归一化的系统吞吐量



张朝柱(1970—),男,辽宁大连人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为信号处理在雷达、通信中的应用研究,图像处理.



尹冬梅(1988—),女,博士,主要研究领域为未来无线网络(下一代 WiFi).



黄文钰(1992—),男,硕士,主要研究领域为无线局域网,无线自组网.