

基于饱和 TCP 流量的 Wi-Fi 级联吞吐量模型

张俊雄, 刘剑钊, 葛晓虎, 吴伟民

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 目前, 无线保真 (Wi-Fi, wireless fidelity) 技术的重要性与商业价值已经获得了广泛认可, 同时人们也追求更好的服务质量 (QoS, quality of service)。传输控制协议 (TCP, transmission control protocol) 作为一种面向连接的、提供端到端可靠性服务的通信协议, 其重要性也日益上升, 是互联网中占主导地位的传输协议。此外, 由于单个接入点 (AP, access point) 的覆盖范围有限, 在许多场景下往往需要通过级联来扩展覆盖范围。然而, 现有的关于级联场景的研究均基于用户数据报协议 (UDP, user datagram protocol), 即认为场景中仅存在下行流量, 而许多场景中上下行流量往往同时存在, 即运行的是 TCP 流量, 在级联场景下用户获得 TCP 吞吐量应如何计算一直是一个尚待解决的问题。针对该问题, 首先在级联场景下建立了饱和 TCP 流量条件下的 Wi-Fi 吞吐量模型, 该模型通过两个马尔可夫链实现对用户吞吐量的计算; 其次, 搭建了级联系统进行实测, 通过对比理论仿真结果与实际测试结果, 对模型的有效性进行了验证。

关键词: Wi-Fi; QoS; TCP; 吞吐量

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00356

Throughput model of Wi-Fi cascading based on saturated TCP traffic

ZHANG Junxiong, LIU Jianzhao, GE Xiaohu, WU Weimin

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: At present, the importance and commercial value of wireless fidelity (Wi-Fi) technology have been widely recognized. And people are also pursuing better quality of service (QoS). Transmission control protocol (TCP) as a connection-oriented communication protocol that provides end-to-end reliability services, its importance is also increasing, and it is the dominant transmission protocol in the Internet. Besides, since the coverage of a single access point (AP) is limited, it is often necessary to extend the coverage through cascading in many scenarios. However, the current research on cascading scenarios is based on the user datagram protocol (UDP), which means that only downlink traffic exists in the scenario. Actually, uplink and downlink traffic often exist at the same time in many scenarios, which means TCP traffic is running. How to calculate the TCP throughput obtained by users in the cascading scenario has always been an unresolved problem. To solve this problem, firstly, a Wi-Fi throughput model under the condition of saturated TCP traffic was established in the cascading scenario, and the calculation of user throughput was realized through two Markov chains. Secondly, a cascading system was built and actual tests were conducted. The validity of the model is verified by comparing the theoretical simulation results with the actual test results.

Key words: Wi-Fi, QoS, TCP, throughput

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-07-04

通信作者: 吴伟民, wuwm@mail.hust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U2001210)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U2001210)

0 引言

无线保真 (Wi-Fi, wireless fidelity) 技术作为无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 的关键接入方式, 自其诞生 20 多年来, 其重要性与商业价值已经获得了广泛认可, 以至于 Wi-Fi 已经成为了 WLAN 的代名词^[1], 各种机构在商场、医院、学校等室内场所部署了大量 Wi-Fi 热点, 以满足人们生活、学习与工作的需求^[2-3]。Wi-Fi 技术的标准协议由美国电气电子工程师学会 (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) 制定, 该协议应用于 WLAN 的介质访问控制 (MAC, medium access control) 协议层与物理层, 是一个 1.5 层的协议, 也被称为 IEEE 802.11 系列协议。IEEE 802.11 提供了极大的可访问性和易用性, 为任何希望与网络相连接的站 (STA, station) 提供了一个开放的环境。

如今, 随着虚拟现实与物联网等技术的发展, 人们对于服务质量 (QoS, quality of service) 的需求也日益提高。为了扩展 IEEE 802.11 网络中对 QoS 的支持, IEEE 于 2005 年提出了 IEEE 802.11e 修正案, 将分布式协调功能 (DCF, distributed coordination function) 扩展为增强分布式信道接入 (EDCA, enhanced distributed channel access)。EDCA 通过给不同优先级的数据流分配不同的竞争参数, 使得优先级越高的数据流, 接入信道的概率越高。学术界对于 EDCA 的研究建立在 DCF 相关研究的基础上, 文献[4]提出了一个基于马尔可夫链的分析模型来计算 DCF 的饱和吞吐量, 但也忽略了 DCF 中的一些参数, 如重传次数上限。文献[5]使用平均值数学模型计算吞吐量, 计算数据与 NS-2 仿真数据吻合, 文献[6]则在模型中进一步考虑数据包重传次数的上限。关于 EDCA 的很多研究^[7-13]都是基于文献[4]的思想, 即采用马尔可夫模型对 EDCA 进行建模, 因为马尔可夫过程可以很好地展现一个待发的数据包在各种状态之间的切换, 及其切换条件。文献[7-9]在进行马尔可夫建模时仅考虑了竞争窗口 (CW, contention window) 这一种差异化参数, 文献[10]将仲裁帧间间隔 (AIFS, arbitration inter-frame space) 系数与 CW 都纳入了考虑范围, 但其仅考虑了两种访问类型 (AC, access category), 计算了饱和条件下的吞吐量和时延。文献[11]将 4 种 AC 都纳入了考虑范围, 在单跳、饱和流量的场景下, 给出了精确的马尔可夫模型。文献[12]则在文献[11]

的基础上, 对不饱和流量场景下的 EDCA 进行建模。近年来, 文献[13]在前人基础上, 不再假设信道条件理想, 分析了 IEEE 802.11 DCF 在不同信道条件下的系统性能, 对单跳网络的吞吐量进行了计算。

诚然, 单跳网络在宿舍这样的小型场所、教室那样的没有墙体阻隔的中型场所, 以及商场那种容易布线的大型场所 (可以部署很多个路由) 是可以使用的, 但国内外也广泛存在着这样的情况: 在房屋建设之初, 人们没有给每个房间都布线, 而房内的墙体很多, 对 Wi-Fi 信号造成很大的干扰, 使得单个 AP 无法覆盖整个房子的范围。在这种情况下, 重新布线的成本是高昂的, 但是无线设备的成本是很低的, 将若干个 AP 级联起来, 使得无线信号覆盖整个房子成为一个可行的方案。AP 的级联能以低廉的成本解决信号覆盖问题, 但对终端用户的吞吐量会带来怎样的影响是一个值得探究的问题。此外, 文献[4-13]均是单跳场景下基于用户数据报协议 (UDP, user datagram protocol) 进行建模的, 而 UDP 是最简单的传输协议, 几乎不提供可靠性措施^[14]。相较于不可靠的 UDP, 传输控制协议 (TCP, transmission control protocol) 是为了在不可靠的互联网上提供可靠的服务而专门设计的一个传输协议, TCP 作为一种面向连接的、可靠的通信协议, 为保证可靠性做了大量工作, 如内部提供确认与超时重传机制等, 故 TCP 更适合应用于对可靠性要求较高的场合。文献[15]对基于 TCP 流量的 EDCA 模型进行了研究, 但仍基于单跳场景, 并且对虚拟时隙的计算方式有误; 文献[16]提出了一个考虑传输速率的 IEEE 802.11 多跳网络端到端吞吐量的解析表达式。文献[17]分析了无线线性多跳网络中聚合 MAC 服务数据单元 (A-MSDU, aggregate MAC service data unit) 聚合方案的性能, 讨论了 UDP 有效载荷大小对帧聚合性能的影响。文献[18-23]同样在多跳场景下对网络性能进行分析, 但也未将 TCP 流量纳入考虑范围。因此, 通过分析级联场景下 EDCA 退避机制以及发送队列的变化, 建立了饱和 TCP 流量下的吞吐量模型, 贡献总结如下。

1) 在级联场景下, 利用马尔可夫链建立了基于饱和 TCP 流量的 Wi-Fi 级联吞吐量模型, 仿真结果表明, 固定光网络终端 (ONT, optical network terminal) 的 CW_{\min} 参数时 (CW_{\min} 表示竞争窗口的最小尺寸), 吞吐量先随着接入点 (AP, access point) 的 CW_{\min} 参数增大而增大, 达到峰值后随着 AP 的

CW_{\min} 参数增大而减小; 固定 AP 的 CW_{\min} 参数时, 吞吐量先随着 ONT 的 CW_{\min} 参数增大而增大, 达到峰值后随着 ONT 的 CW_{\min} 参数增大而减小;

2) 搭建了级联系统进行实测, 并且将理论仿真的吞吐量变化曲线与实际测试结果进行对比, 得到了理论吞吐量与实测吞吐量变化趋势一致的结论, 验证了模型的有效性, 使用该模型能够推测出级联场景下吞吐量随各设备 CW_{\min} 参数变化的趋势, 并且能够准确地设置设备的 CW_{\min} 参数使吞吐量最大化, 有着很好的工业应用价值。

1 系统模型

1.1 级联场景

本文的建模场景为级联场景, 在此场景中 STA 连接到 AP, AP 再连接到 ONT, 级联场景示意图如图 1 所示。在该场景中, 本文假设信道是理想的, ONT 的流量模型为饱和 TCP 流量, 3 台设备仅发送/接收同一种 AC, 当 STA 接收一个数据包后向 ONT 回复一个确认字符 (ACK, acknowledge character)。

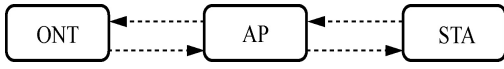


图 1 级联场景示意图

为了求得级联场景下 STA 的 TCP 吞吐量, 需要针对该场景建立发送队列模型计算 AP-STA 的虚拟时隙。数据包和 ACK 的发送都需要设备竞争信道, 而 IEEE 802.11 MAC 层的核心为 EDCA 机制, 因此若想得到各设备的发包概率就需要对 EDCA 机制进行全面的分析, 通过发包概率可进一步求解得到 AP-STA 虚拟时隙的大小。接下来简单介绍 EDCA 机制和虚拟时隙的定义。

1.2 EDCA 机制

无线局域网中站点竞争信道发包的核心是 EDCA 机制, 在 EDCA 中, 协议将数据包划分为 4 种优先级不同的 AC, 按优先级从高到低排列, 分别是语音流 (AC3)、视频流 (AC2)、尽力而为流 (AC1) 与背景流 (AC0), EDCA 流程如图 2 所示。

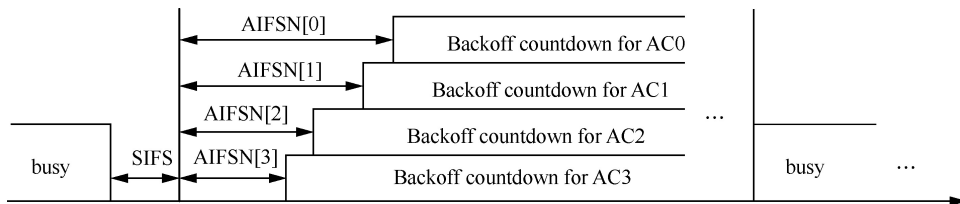


图 2 EDCA 流程

其中, SIFS 表示短的帧间间隔 (SIFS, short interframe space), AIFSN 表示仲裁帧间间隔数 (AIFSN, arbitration interframe space number), k 为 AC 类别标号。想要接入信道的 AC 需要持续侦听信道, 当发现信道处于空闲时, 继续保持时长为 $SIFS + AIFSN [k]$ 的侦听, 这一段 $SIFS + AIFSN [k]$ 的时长也称为仲裁帧间间隔 (AIFS, arbitration interframe space)。当信道在 AIFS 内保持空闲则可以开始退避倒计时, 计时的值为 $a \cdot slot$, $slot$ 为协议定义的一个 $9 \mu s$ 的时段, 称为时隙, 系数 a 的取值范围为 $[0, W_{k,i} - 1]$, $W_{k,i}$ 表示第 k 类 AC 第 i 次重传的竞争窗口尺寸; 若在这段时间内信道繁忙, 则等待信道重新空闲后重新侦听。 $W_{k,i}$ 的初始值为 $2^{CW_{\min}}$, 若没有与其他 AC 发生碰撞则数据包发送成功, 当各 AC 重新监听到信道空闲时则进行下一次退避竞争; 若与其他 AC 发生碰撞则需要倍增 $W_{k,i}$ 后重新在区间内随机选取一个退避时间进行重传, 倍增上限为 $2^{CW_{\max}}$, CW_{\max} 表示竞争窗口的最大尺寸, 当达到上限后则退避时间上限不再增加并直接重传, 仍传输失败若干次则丢包, 这一机制称为二进制指数退避。 $W_{k,i}$ 计算式为

$$W_{k,i} = \begin{cases} 2^i W_{k,0} = 2^{i+CW_{\min}}, & 0 \leq i \leq m_{k,L} - 1 \\ 2^{m_{k,L}} W_{k,0} = W_{k,\max} = 2^{CW_{\max}}, & m_{k,L} \leq i \leq m_k \end{cases} \quad (1)$$

其中, $m_{k,L}$ 表示第 k 类 AC 的退避时间上限达到最大值所需要的倍增次数, 即 $CW_{\max} - CW_{\min}$; m_k 为 Wi-Fi 设备定义的最大重传次数。

1.3 虚拟时隙

虚拟时隙的定义为系统两次成功发包结束的间隔时间, 其中包含了信道空闲、碰撞重传、系统成功发包 3 种情况, 本文中系统成功发包指的是 ONT、AP 与 STA 中任一设备成功发包。当系统成功发包时, 该虚拟时隙结束, 虚拟时隙构成如图 3 所示。

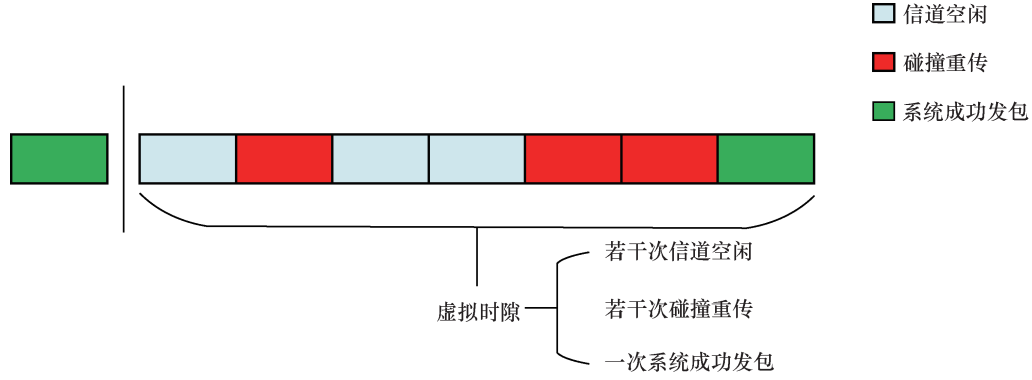


图3 虚拟时隙构成

1.4 发送队列模型

根据各设备发包队列的变化情况构建马尔可夫模型，设 TCP 接收窗口最大值为 w ，因 ONT 侧发送饱和流量，故其发送队列始终饱和，用二维随机机变量 (i, j) 表示 AP 与 STA 发送队列的状态， i 与 j 均为自然数，AP 与 STA 的发送队列中数据包的数量受 TCP 接收窗口限制，即 $i + j = w$ 。根据数据包发送过程中的变化情况可构建马尔可夫链，当系统成功发包后，发送队列状态发生一次转移，AP 与 STA 发送队列状态转移如图 4 所示。

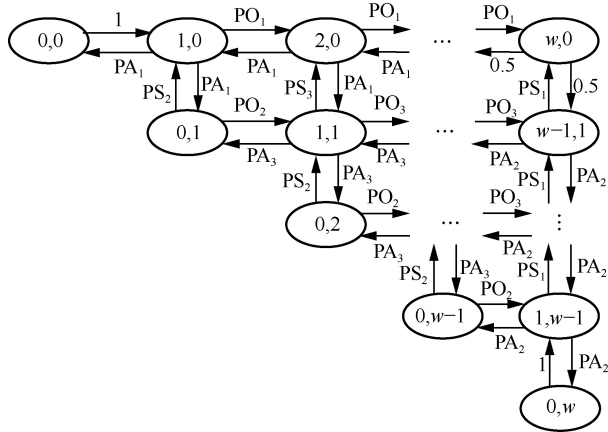


图4 AP 与 STA 发送队列状态转移

图 4 中，向右状态转移表示 ONT-AP 成功发包，AP 中包队列长度+1，对应转移概率的值为 PO；向左状态转移表示 AP-ONT 上行成功发包，AP 中包队列长度-1，对应转移概率的值为 PA；向下状态转移表示 AP-STA 下行成功发包，AP 中包队列长度-1，STA 中包队列长度+1，对应转移概率的值同样为 PA；向上状态转移表示 STA-AP 成功发包，AP 中包队列长度+1，STA 中包队列长度-1，对应转移概率的值为 PS。

通过求得各状态下虚拟时隙长度以及转移概率，即可求得 STA 吞吐量。

2 理论分析

根据第 1 节提出的发送队列模型，首先针对发包设备的状态不同将系统状态分为 7 种情况，其次通过对 EDCA 机制的建模求解出不同状态下各设备发包概率，进而求解状态转移概率、各状态下的虚拟时隙长度以及下行吞吐量。

1) 状态 $(i, j), i \neq 0, j \neq 0, i + j \neq w$ ，此时 ONT、AP 以及 STA 均可以发包，设 τ_0 、 τ_1 与 τ_2 分别为 ONT、AP 与 STA 在每个时隙内的发包概率，依据文献[4,24]的 EDCA 分析模型，可得 τ_0 、 τ_1 与 τ_2 的计算式为

$$\tau_k = \frac{1 - p_k^{m_k+1}}{1 - p_k} b_{k,0,0} \quad (2)$$

$$b_{k,0,0} = \left[\frac{1 - p_k^{m_k+1}}{p_k} + \frac{\phi_k}{g_k} \right]^{-1} \quad (3)$$

详细推导过程见文献[24]，联立式 (2)、式 (3) 可得

$$\begin{cases} \tau_0 = \psi_0(\tau_0, \tau_1, \tau_2) \\ \tau_1 = \psi_1(\tau_0, \tau_1, \tau_2) \\ \tau_2 = \psi_2(\tau_0, \tau_1, \tau_2) \end{cases} \quad (4)$$

用数值方法解式(4)可得 τ_0 、 τ_1 与 τ_2 ，则转移概率 PO_3 、 PA_3 、 PS_3 为

$$\begin{cases} P_S = P_{OS} + P_{AS} + P_{SS} \\ P_{OS} = \tau_0(1 - \tau_1)(1 - \tau_2) \\ P_{AS} = \tau_1(1 - \tau_0)(1 - \tau_2) \\ P_{SS} = \tau_2(1 - \tau_0)(1 - \tau_1) \\ PO_3 = P_{OS}/P_S \\ PA_3 = 0.5P_{AS}/P_S \\ PS_3 = P_{SS}/P_S \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_s 为系统成功发包的概率, P_{OS} 为 ONT 成功发包的概率, P_{AS} 为 AP 成功发包的概率, P_{SS} 为 STA 成功发包的概率。虚拟时隙的长度为 a~d 4 种情况的加权和, 情况 a 为虚拟时隙结束时 ONT 成功发包, 设虚拟时隙共包含 $(n+1)$ 个真实时隙, 其构成如图 5 所示。

情况 a 的虚拟时隙 μ_o 为

$$\begin{cases} \mu_o = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_1^m P_C^{n-m} P_{OS} [mT_1 + (n-m)T_C + T_{OS}] \\ P_1 = (1-\tau_0)(1-\tau_1)(1-\tau_2) \\ P_C = 1 - P_s - P_1 \\ T_1 = \text{slot} \\ T_C = T_a + \text{EIFS} + \text{AIFS} \\ T_{OS} = N_{DD}/v_o \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_1 为信道保持空闲的概率, P_C 为设备发包产生碰撞的概率, T_1 为一个时隙内若发生空闲情况所消耗的时间, T_C 为一个时隙内若发生碰撞重传所消耗的时间, T_{OS} 为 ONT 成功发包所消耗的时间, T_a 为下行数据包的聚合时间, EIFS 为 IEEE 802.11 协议规定的扩展帧间间隔 (EIFS, extended interframe space), N_{DD} 为下行数据的 bit 数, v_o 为 ONT 的空口速率。

与情况 a 同理, 情况 b 与情况 c 的最后一个时隙为 AP 成功发包, 此时的虚拟时隙 μ_A 为

$$\begin{cases} \mu_A = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_1^m P_C^{n-m} P_{AS} [mT_1 + (n-m)T_C + T_{AS}] \\ T_{AS} = 0.5N_{DD}/v_A + 0.5N_{UD}/v_A \end{cases} \quad (7)$$

其中, N_{UD} 为上行数据的 bit 数, v_A 为 AP 的空口速率, T_{AS} 为 AP 成功发包所消耗的时间, 上下行数

据包比值为 1:1, 因此当 AP 成功发包时, 所消耗的时间应该是上行与下行发包所消耗时间的加权和。

情况 d 的虚拟时隙 μ_s 为

$$\begin{cases} \mu_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_1^m P_C^{n-m} P_{SS} [mT_1 + (n-m)T_C + T_{SS}] \\ T_{SS} = N_{UD}/v_s \end{cases} \quad (8)$$

其中, T_{SS} 为 STA 成功发包所消耗的时间, v_s 为 STA 的空口速率。最终状态 (i, j) 的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = PO_3\mu_o + 2PA_3\mu_A + PS_3\mu_s \quad (9)$$

而 STA 获得的吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$S_{i,j} = \frac{N_{DD}PA_3}{\mu_{i,j}} \quad (10)$$

2) 状态 $(i, j), i \in [1, w-1], j = 0$, 此时 ONT、AP 可以发包, STA 不进行发包, 依据式(2)、式(3)可求得 ONT 的发包概率 τ_0 与 AP 的发包概率 τ_1 , 则转移概率 PO_1 , PA_1 可表示为

$$\begin{cases} P_s = P_{OS} + P_{AS} \\ P_{OS} = \tau_0(1-\tau_1) \\ P_{AS} = \tau_1(1-\tau_0) \\ PO_1 = P_{OS}/P_s \\ PA_1 = 0.5P_{AS}/P_s \\ P_1 = (1-\tau_0)(1-\tau_1) \end{cases} \quad (11)$$

此状态下的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = PO_1\mu_o + 2PA_1\mu_A \quad (12)$$

$$S_{i,j} = \frac{N_{DD}PA_1}{\mu_{i,j}} \quad (13)$$

3) 状态 $(i, j), j \in [1, w-1], i = 0$, 此时 ONT、STA 可以发包, AP 不进行发包, 依据式(2)、式(3)可求

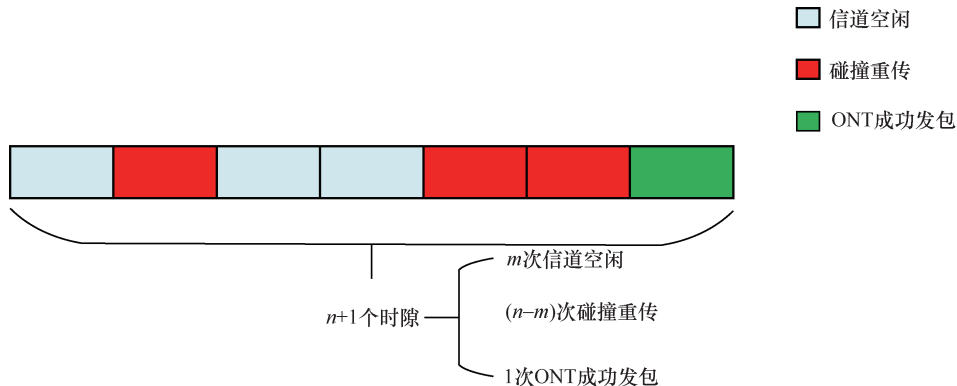


图 5 情况 a 的虚拟时隙构成

得 ONT 的发包概率 τ_0 与 STA 的发包概率 τ_2 ，则转移概率 PO_2 、 PS_2 可表示为

$$\begin{cases} P_S = P_{OS} + P_{SS} \\ P_{OS} = \tau_0(1 - \tau_2) \\ P_{SS} = \tau_2(1 - \tau_0) \\ PO_2 = P_{OS}/P_S \\ PS_2 = P_{SS}/P_S \\ P_1 = (1 - \tau_0)(1 - \tau_2) \end{cases} \quad (14)$$

此状态下的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = PO_2\mu_0 + PS_2\mu_s \quad (15)$$

$$S_{i,j} = 0 \quad (16)$$

4) 状态 $(i, j), i \neq 0, j \neq 0, i + j = w$ ，此时 AP、STA 可以发包，ONT 不进行发包，依据式(2)、式(3)可求得 AP 的发包概率 τ_1 与 STA 的发包概率 τ_2 ，则转移概率 PA_2 、 PS_1 可表示为

$$\begin{cases} P_S = P_{AS} + P_{SS} \\ P_{AS} = \tau_1(1 - \tau_2) \\ P_{SS} = \tau_2(1 - \tau_1) \\ PA_2 = P_{AS}/P_S \\ PS_1 = P_{SS}/P_S \\ P_1 = (1 - \tau_1)(1 - \tau_2) \end{cases} \quad (17)$$

此情况下的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = PA_2\mu_A + PS_1\mu_s \quad (18)$$

$$S_{i,j} = \frac{N_{DD}PA_2}{\mu_{i,j}} \quad (19)$$

5) 状态 $(0, 0)$ ，此时仅有 ONT 需要发包，当虚拟时隙结束时，一定是 ONT 成功发包，故转移概率为 1，与上文同理可求得 ONT 的发包概率 τ_0 。此状态下的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = T_{OS} + \sum_{m=0}^{\infty} mT_1(1 - \tau_0)^m \tau_0 = T_{OS} + T_1 \frac{1 - \tau_0}{\tau_0} \quad (20)$$

$$S_{i,j} = 0 \quad (21)$$

6) 状态 $(w, 0)$ ，此时 ONT 已发送的数据包数量已达到上限，ONT 无法发包而 STA 发送队列为空，仅有 AP 需要发包，由于 STA 接收一个数据包后回复一个 ACK，可认为在 AP 中上下行数据包的比值为 1:1，故向左与向下的转移概率均为 0.5，与上文同理可求得 AP 的发包概率 τ_1 。此状态下的虚

拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = T_{AS} + \sum_{m=0}^{\infty} mT_1(1 - \tau_1)^m \tau_0 = T_{AS} + T_1 \frac{1 - \tau_1}{\tau_1} \quad (22)$$

$$S_{i,j} = \frac{N_{DD}}{\mu_{i,j}} \quad (23)$$

7) 状态 $(0, w)$ ，此时 ONT 已发送的数据包数量已达到上限，ONT 无法发包而 AP 发送队列为空，仅有 STA 需要发包，故转移概率为 1，与上文同理可求得 STA 的发包概率 τ_2 。此状态下的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 和吞吐量 $S_{i,j}$ 为

$$\mu_{i,j} = T_{SS} + \sum_{m=0}^{\infty} mT_1(1 - \tau_2)^m \tau_2 = T_{SS} + T_1 \frac{1 - \tau_2}{\tau_2} \quad (24)$$

$$S_{i,j} = 0 \quad (25)$$

至此，如图 3 中的转移概率、各状态的虚拟时隙 $\mu_{i,j}$ 以及用户吞吐量 $S_{i,j}$ 均已求出，依据文献[25]通过转移概率可求图 3 的稳态分布 $\pi = [\pi_{0,0}, \pi_{0,1}, \pi_{0,1}, \dots, \pi_{0,w}]$ ，则 STA 的总吞吐量为

$$S = S_{i,j} \frac{\pi_{i,j}\mu_{i,j}}{\sum_{j=0}^w \sum_{i=0}^{w-j} \pi_{i,j}\mu_{i,j}} \quad (26)$$

3 仿真分析及实测对比

3.1 参数设置

本章依据第 2 节理论建模结果进行仿真分析，并将本文提出的模型仿真结果与实际测试结果进行比对。根据 IEEE 802.11ax 协议内容及项目要求，仿真及测试参数设置见表 1。

本文采用 MATLAB 工具进行仿真，考虑各设备处于理想的信道环境下且流量始终处于饱和状态，即性能不会受到外界环境的影响，并且每一时隙内都有数据进行传输。本文测试环境采用华为公司内屏蔽房，ONT 设备型号为 HS8346，AP 型号为 K562e，终端为 P40，测试设备支持 IEEE 802.11ax 协议，使用 IxChariot 软件进行满流测试，仿真与测试参数保持一致，STA 的 CW_{min} 参数始终保持不变。

3.2 仿真结果

1) 固定 ONT 的 CW_{min} 参数，AP 的 CW_{min} 参数从 1 增大到 10，吞吐量与 AP 的 CW_{min} 参数的关系如图 6 所示。

由图 6 可知，当 ONT 的 CW_{min} 参数固定为任意

表 1 仿真及测试参数设置

| 参数 | 说明 | 设定值 |
|----------|------------------------|--------------|
| MSDU | MAC 服务数据单元大小 | 1 548 byte |
| MSDU_N | MAC 协议数据单元内的 MSDU 聚合数量 | 3 |
| MPDU_N | 物理层协议数据单元内 MPDU 聚合数量 | 64 |
| ACK | STA 回复确认报文大小 | 40 byte |
| R | 各设备空口速率 | 2 144 Mbit/s |
| σ | 时隙 | 9 μ s |
| SIFS | 最小帧间间隔 | 16 μ s |
| AIFSN | 各设备仲裁帧间间隔数 | 3 |
| w | STA 接收窗口 | 3 |

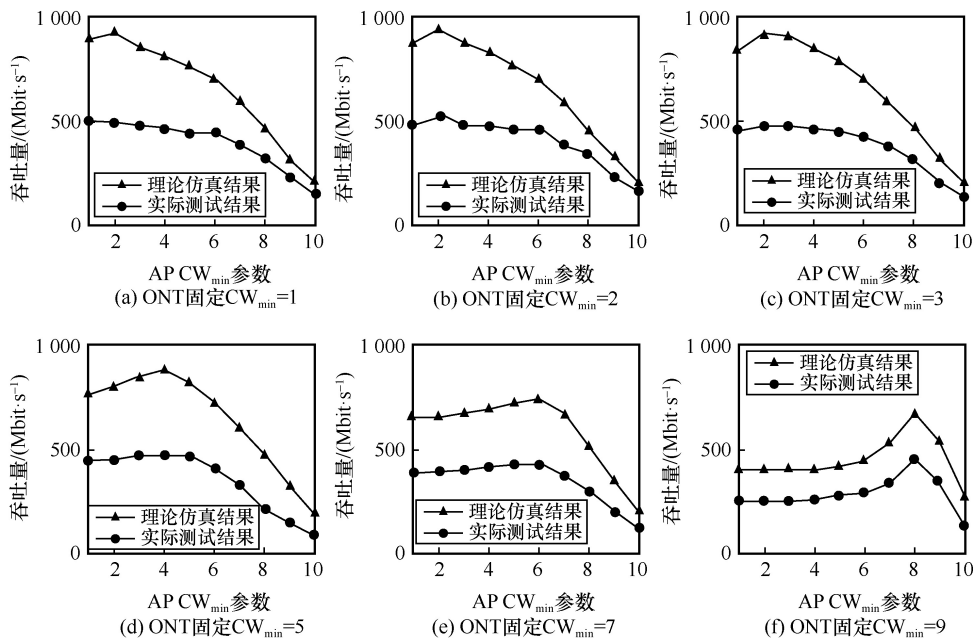


图 6 吞吐量与 AP 的 CW_{min} 参数的关系

值时，吞吐量先随着 AP 的 CW_{min} 参数增大而增大，达到峰值后随着 AP 的 CW_{min} 参数增大而减小，仿真与实测的趋势完全一致，并且峰值点也完全准确。但由于实际测试环境无法达到理想的信道条件，因此仿真结果和实测结果在数值上存在一定差异。

2) 固定 AP 的 CW_{min} 参数，ONT 的 CW_{min} 参数从 1 增大到 10，吞吐量与 ONT 的 CW_{min} 参数的关系如图 7 所示。

由图 7 可知，当 AP 的 CW_{min} 参数固定为 1 时，吞吐量随着 ONT 的 CW_{min} 参数增大而减小；当 AP 的 CW_{min} 参数固定为 2、3、5、7、9 时，吞吐量先随着 ONT 的 CW_{min} 参数增大而增大，达到峰值后随着 ONT 的 CW_{min} 参数增大而减小，仿真与实测的趋势完全一致，并且峰值点也完全准确。但由于实际

测试环境无法达到理想的信道条件，仍会存在一定干扰，并且即便系统在屏蔽房环境中运行，TCP 窗口值也会在最大值附近发生波动，本文为了便于分析而假设了 TCP 窗口值达到最大值后不再变化，因此仿真结果和实测结果在数值上存在一定差异。

4 结束语

在级联场景下，对 EDCA 退避机制以及发送队列的变化进行了分析，基于饱和 TCP 流量建立了 Wi-Fi 吞吐量模型，该模型构建了两个马尔可夫链，一个二维马尔可夫链描述 ONT、AP 与 STA 的空口竞争过程，另一个二维马尔可夫链描述 AP 与 STA 发送队列的变化情况，以此计算吞吐量。仿真与实测结果对比，验证了本文提出模型的有效性，使用

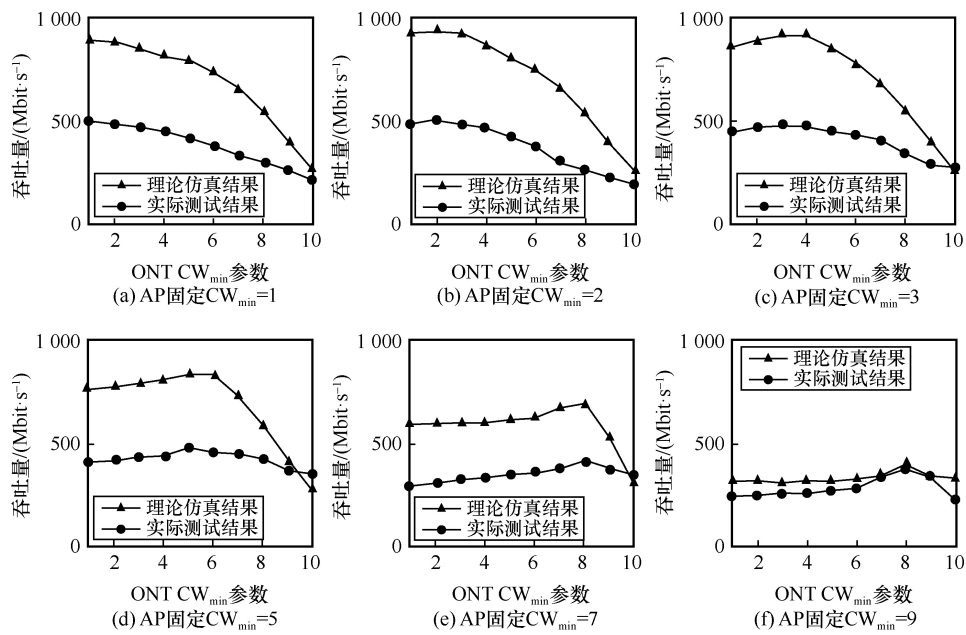


图7 吞吐量与ONT的CW_{min}参数的关系

该模型能够推测出级联场景下吞吐量随各设备CW_{min}参数变化的趋势,并且能够准确地设置设备的CW_{min}参数使吞吐量最大化,有着很好的工业应用价值。

参考文献:

[1] 华为. 释放 Wi-Fi 的潜能, 2019~2023 企业级 Wi-Fi 6 产业发展与展望白皮书[EB]. 2019.
HUAWEI. Unleash the potential of Wi-Fi, 2019~2023 enterprise Wi-Fi 6 industry development and prospect white paper[EB]. 2019.

[2] 林玉梅, 章喜字. 高校校园 WLAN 安全方案设计与实施[J]. 软件导刊, 2016, 15(6): 200-201.
LIN Y M, ZHANG X Z. Design and implementation of WLAN security scheme in university campus[J]. Software Guide, 2016, 15(6): 200-201.

[3] 俞晓辉, 何伟. 无线局域网(WLAN)模块化建设思想在南京联通工程建设中的实践和探索[J]. 中国新通信, 2019, 21(17): 55-56.
YU X H, HE W. Practice and exploration of modular construction of WLAN in Nanjing unicom project construction[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(17): 55-56.

[4] 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.

[5] TAY Y C, CHUA K C. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol[J]. Wireless Networks, 2001, 7(2): 159-171.

[6] WU H T, PENG Y, LONG K P, et al. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement[C]//Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 2002: 599-607.

[7] XIAO Y. Backoff-based priority schemes for IEEE 802.11[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1568-1572.

[8] HE J H, ZHENG L, YANG Z K, et al. Performance analysis and service differentiation in IEEE 802.11 WLAN[C]//Proceedings of 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2003: 691-697.

[9] HUI J, DEVETSIKIOTIS M. Designing improved MAC packet schedulers for 802.11e WLAN[C]//Proceedings of GLOBECOM '03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No.03CH37489). Piscataway: IEEE Press, 2004: 184-189.

[10] ZHU H, CHLAMTAC I. Performance analysis for IEEE 802.11e EDCF service differentiation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(4): 1779-1788.

[11] LEE J Y, LEE H S. A performance analysis model for IEEE 802.11e EDCA under saturation condition[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(1): 56-63.

[12] ZHENG J, WU Q. Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11p EDCA mechanism for VANET[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2673-2687.

[13] ZHANG Y Y, LI S P, SHANG Z H, et al. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF under different channel conditions[C]//Proceedings of 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1904-1907.

[14] 张虹. UDP 与 TCP 结合实现多进程通信[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002(z1): 4.
ZHANG H. Combining UDP and TCP to realize multi-process communication[J]. Journal of SUN YAT-SEN University (Social Science Edition), 2002(z1): 4.

[15] YU J, CHOI S, QIAO D J. TCP dynamics over IEEE 802.11e WLANs: modeling and throughput enhancement[C]//Proceedings of 2007 Fourth International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS '07). Piscataway: IEEE Press,

- 2008: 66-75.
- [16] KANEMATSU T, NGUYEN K, SEKIYA H. Throughput analysis for IEEE 802.11 multi-hop networks considering transmission rate[C]// Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [17] GUO Y H, LI Z X, YANG Z X. Performance analysis of A-MSDU and UDP in IEEE 802.11 wireless linear multi-hop network[C]// Proceedings of 2020 IEEE 10th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 22-25.
- [18] DEMIRTAŞ O, ILYAS M. Cloud assisted approach for determining Wi-Fi problems in field deployed mesh APs - A case study for quality problems[C]// Proceedings of 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [19] MACABALE N A, VILLASOTO A N, RIVERA J D, et al. CRADLE: cross-layer design for load-aware routing in IEEE 802.11-based wireless mesh and sensor networks[C]// Proceedings of 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 970-974.
- [20] MAESAKO K, TAKAKI Y, KAMADA T, et al. Asymmetric hidden node problem aware routing metric for wireless mesh networks[C]// Proceedings of 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [21] RETHFELDT M, BROCKMANN T, ECKHARDT R, et al. Extending the flexible network tester (flent) for IEEE 802.11s WLAN mesh networks[C]// Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [22] BACKHAUS M, ROSSBERG M, SCHAEFER G. Towards a realistic maximum flow model in hybrid multi-channel wireless mesh networks[C]// Proceedings of 2021 Wireless Days (WD). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [23] GOKALGANDHI B, TAVARES M, SAMARDZIJA D, et al. Reliable low-latency Wi-Fi mesh networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4533-4553.
- [24] KIRAN M P R S, RAJALAKSHMI P. Saturated throughput analysis of IEEE 802.11ad EDCA for high data rate 5G-IoT applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4774-4785.
- [25] VALLEJOS C R A, MARTÍNEZ V J M. A fast transformation of

Markov chains and their respective steady-state probability distributions[J]. The Computer Journal, 2014, 57(1): 1-11.

[作者简介]



张俊雄（1997-），男，华中科技大学博士生，主要研究方向为无线通信等。



刘剑钊（1999-），男，华中科技大学硕士生，主要研究方向为无线通信等。



葛晓虎（1972-），男，博士，华中科技大学教授，主要研究方向为移动通信、无线网络中的流量建模、绿色通信等。



吴伟民（1970-），男，博士，华中科技大学副教授，主要研究方向为无线通信系统与样机、Wi-Fi 协议创新性、MAC 传输优化等。