

# 非饱和 WLAN 中多链路 EDCA 的捕获感知性能分析

钟祎<sup>1</sup>, 毕王霖峰<sup>1</sup>, 葛晓虎<sup>1</sup>, 黄逸<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 对非饱和无线局域网 (WLAN) 中的多链路增强型分布式信道接入 (EDCA) 协议进行了全面的性能分析, 重点关注捕获感知传输动态。为了准确建模非饱和条件下的退避行为, 通过引入一个空闲状态来扩展传统的马尔可夫链框架, 该空闲状态捕获了在退避计数器为零且没有外部碰撞发生时的时延概率。此外, 多链路竞争节点的空间分布采用随机几何框架中的泊松点过程进行建模, 从而推导出一个新颖的、特定于业务类别的捕获概率模型。该模型量化了干扰、部署密度、接入点覆盖半径和捕获阈值对每个接入类别 (AC) 传输成功概率的影响。仿真结果表明, 当非 AP 多链路设备的部署密度低于每平方米 0.25 个设备且捕获阈值小于 35 dB 时, 捕获效应可将碰撞概率降低 8.06%, 并将高优先级 AC 的吞吐量提高 40% 以上。这些发现为 IEEE 802.11be 及未来 WLAN 系统中的自适应 EDCA 参数调整和空间网络规划提供了指导。

**关键词:** 增强型分布式信道接入; 多链路 WLAN; 马尔可夫链模型; 随机几何; 捕获效应; 非饱和业务  
**中图分类号:** TP393.0

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2025240

## Capture-aware performance analysis of multi-link EDCA in unsaturated WLAN

ZHONG Yi<sup>1</sup>, BI Wanglinfeng<sup>1</sup>, GE Xiaohu<sup>1</sup>, HUANG Yi<sup>2</sup>

1. School of Electronic Information and Communication, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

**Abstract:** A comprehensive performance analysis of multi-link enhanced distributed channel access (EDCA) was presented in unsaturated wireless local area network (WLAN), with a focus on capture-aware transmission dynamics. To accurately model the backoff behavior under non-saturation conditions, the traditional Markov chain framework was extended by introducing an idle state, capturing the probability of deferral when no external collisions occurred at a zero backoff counter. Furthermore, the spatial distribution of multi-link contention nodes was modeled using a Poisson point process within a stochastic geometry framework, allowing for the derivation of a novel, traffic-class-specific capture probability model. This model quantified the impact of interference, deployment density, access point coverage radius, and capture thresholds on the transmission success probability of each access category (AC). Simulation results demonstrate that, when the deployment density of non-AP multi-link devices is below 0.25 devices/m<sup>2</sup> and the capture threshold is less than 35 dB, the capture effect can reduce collision probability by 8.06% and improve high-priority AC throughput by more than 40%. These findings provide guidelines for adaptive EDCA parameter tuning and spatial network planning in IEEE 802.11be and beyond WLAN systems.

**Keywords:** EDCA, multi-link WLAN, Markov chain model, random geometry, capture effect, non-saturated operation

收稿日期: 2025-08-12; 修回日期: 2025-09-23

通信作者: 黄逸, huangyi718b@tongji.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62471193)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.62471193)

## 0 引言

增强现实 (AR)<sup>[1]</sup>、虚拟现实 (VR)<sup>[2]</sup>和工业自动化<sup>[3]</sup>等高吞吐量无线应用的激增,对无线局域网 (WLAN) 提出了前所未有的要求,即更大的容量、更低的时延和更高的可靠性。为响应这些需求,IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) 标准引入了多链路操作 (MLO),使设备能够在多条无线电链路上进行数据传输和接收<sup>[4-5]</sup>。这种设计显著提高了网络的灵活性和效率,尤其是在拥塞环境中。

为了支持异构流量之间的服务质量 (QoS) 区分,增强型分布式信道接入 (EDCA) 仍然是 WLAN 介质访问控制的基石。尽管针对单链路和饱和网络环境下的 EDCA 已经开发了广泛的分析模型,但它们无法直接扩展到多链路非饱和环境。在实践中, WLAN 流量通常是突发且高度动态的,这使饱和假设不切实际。此外,跨无线电链路存在的多个竞争域引入了复杂的交互作用,这是传统单链路模型无法捕获的。

影响多链路 WLAN 性能的一个关键因素是捕获效应,即在存在并发传输的情况下,只要数据包的信噪比加干扰比 (SINR) 超过特定阈值,它仍可能被正确接收。现有的 EDCA 模型通常忽略这种现象或对其进行简单处理,从而忽略了其对吞吐量和碰撞概率的重大影响,尤其是在空间多样化部署中。

为了准确地建模这些效应,有必要纳入多链路竞争者的空间分布,这在实际网络中本质上是随机的。随机几何,特别是空间点过程,提供了一个强大的框架来表示这种随机性并量化干扰下的数据包捕获概率。然而,很少有研究将随机几何与多链路、非饱和状态下的 EDCA 建模相结合。

这些局限性促使旨在开发一个全面且易于分析的框架,用于建模非饱和网络中的多链路 EDCA,并纳入捕获效应和空间随机性,以更好地理解 EDCA 参数的性能权衡,并为下一代 WLAN 中的协议优化提供理论指导。

IEEE 802.11 MAC 协议的性能建模已在各种网络场景下得到了广泛研究。Bianchi<sup>[6]</sup>建立了饱和和分布式协调功能 (DCF) 的马尔可夫链模型,随后该模型被 Xiao 等<sup>[7]</sup>和 Tantra 等<sup>[8]</sup>使用三维马尔可夫链扩展到 EDCA。然而,这些模型受限于

理想化的饱和假设<sup>[9]</sup>,加上对内部碰撞的粗略建模,降低了它们对现实突发流量的适用性。

为了解决更真实的流量条件,研究人员通过引入代表空队列的空闲状态,开发了非饱和 EDCA 模型。例如,Prakash 等<sup>[10]</sup>引入了一个假设泊松数据包到达的非饱和模型,但他们的分析仅限于吞吐量,并未充分考虑仲裁帧间间隔数 (AIFSN) 和重传限制等 EDCA 参数的影响。Huang 等<sup>[11-12]</sup>也分析了语音 AC 的非饱和行为,但他们的方法缺乏跨 AC 的通用性。

同时,IEEE 802.11be 引入 MLO 作为提高频谱利用率和降低时延的关键特性<sup>[4,13-14]</sup>。越来越多的文献开始研究多链路 MAC 性能。Korolev 等<sup>[15]</sup>和 Zhang 等<sup>[16]</sup>在饱和条件下对多链路 DCF 协议进行了建模,分析了不同同步模式下的吞吐量。Song 等<sup>[17]</sup>分析了这些协议的时延。López-Raventós 等<sup>[18-20]</sup>和 Kulshrestha 等<sup>[21]</sup>提出了多链路设备的启发式流量分配方案,重点关注公平性和利用率。然而,这些研究大多忽略了 EDCA 的 QoS 机制,通常回归到更简单的 DCF 模型,从而忽略了优先级流量的关键性能动态。

另一个重要但尚未充分探索的因素是捕获效应,即尽管存在并发传输,但强信号仍可能被成功解码。多项工作<sup>[22-25]</sup>证明了其在具有衰落的饱和载波侦听多路访问/冲突避免 (CSMA/CA) 网络中(特别是在车载或密集部署中)的性能优势。然而,它很少被纳入 EDCA 模型中,这严重限制了模型的实际适用性。这种遗漏通常会导致过于悲观的性能预测,阻碍了发现本文旨在揭示的更复杂的网络动态。

最后,竞争设备的空间建模通常被过度简化为均匀分布,这未能反映实际部署中用户位置的随机性。随机几何,特别是空间点过程,已成为建模无线网络中空间交互的强大工具<sup>[26-30]</sup>。然而,它与 EDCA 性能分析的结合,特别是针对多链路非饱和场景,仍然有限。

本文提出了一个全面的分析框架,用于建模和评估 IEEE 802.11be 网络中非饱和条件下的多链路 EDCA。主要贡献如下。

1) 开发了一种新的马尔可夫链模型,用于捕获多链路 EDCA 在非饱和和流量条件下多接入类别 (AC) 的行为。引入了一个空闲状态来反映队列动

态,从而能够准确地表征跨优先级别的性能。

2)将捕获效应纳入成功传输和碰撞概率的计算中,考虑了异构链路距离和功率变化。采用基于随机几何的框架(使用泊松点过程)来建模竞争站点的空间分布。

3)该框架专为 IEEE 802.11be 同步非同时发送和接收(NSTR)模式下的最长退避多链路接入(MLA-L)机制设计,并通过广泛的仿真进行了验证。结果显示,对空间干扰进行现实建模并纳入捕获效应对准确评估多链路场景中的 EDCA 性能至关重要。

### 1 多链路 EDCA 的分析建模

#### 1.1 协议概述与多链路操作

IEEE 802.11be 标准引入 MLO 作为一项关键增强功能,通过允许多链路信道接入来提高吞吐量和降低时延。定义了 2 种操作模式:同时发送和接收(STR)与非同时发送和接收(NSTR)<sup>[31]</sup>。同时发送和接收操作如图 1(a)所示,STR 模式允许独立链路操作,例如跨不同链路的同步传输和接收<sup>[32]</sup>。然而,STR 模式需要复杂的天线隔离和干扰抑制机制。非同时发送和接收操作如图 1(b)所示,NSTR 模式限制多链路设备在给定的传输周期内只能在所有链路上进行发送或接收<sup>[33-34]</sup>,从而简化了硬件设计。

为了协调 NSTR 下的接入,IEEE 802.11be 定义

了 2 种同步机制:最长退避多链路接入(MLA-L)和最短退避多链路接入(MLA-S)。在 MLA-L 中,所有链路独立地递减其退避计数器,并且只有当所有参与链路上的计数器都达到零时,才会发生联合信道接入尝试,从而有效地同步到具有最长退避时间的链路,如图 2(a)所示。相比之下,MLA-S 在最小计数器达到零时冻结其他链路的退避计数器,如图 2(b)所示<sup>[15]</sup>。本文采用 MLA-L 机制,因为它具有确定性的退避行为且硬件简单。

EDCA 信道接入时序如图 3 所示,由图 3 可以看出,EDCA 协议通过使用不同的 AIFSN、竞争窗口(CW)和传输机会(TXOP)来区分 4 个 AC 的接入优先级,从而对 CSMA/CA 进行了改进。每个 AC 都有自己的退避计数器操作一个虚拟队列,这使 EDCA 特别适用于对 QoS 敏感的流量,例如语音和视频。将 EDCA 纳入多链路环境会引入链路和 AC 之间复杂的交互作用,特别是在非饱和流量条件下,这激发了在后续章节中开发分析模型的动机。

EDCA 是 IEEE 802.11e 及后续标准的核心组成部分,通过为每个 AC 分配差异化的信道接入参数来改进 CSMA/CA。每个 AC 都有自己的独立退避过程,较小的 AIFS 和 CW<sub>min</sub> 值赋予时延敏感型流量(如语音和视频)更高的优先级。这种基于 AC 的差异化构成了单链路和多链路 WLAN 中服务优先级划分的基础。

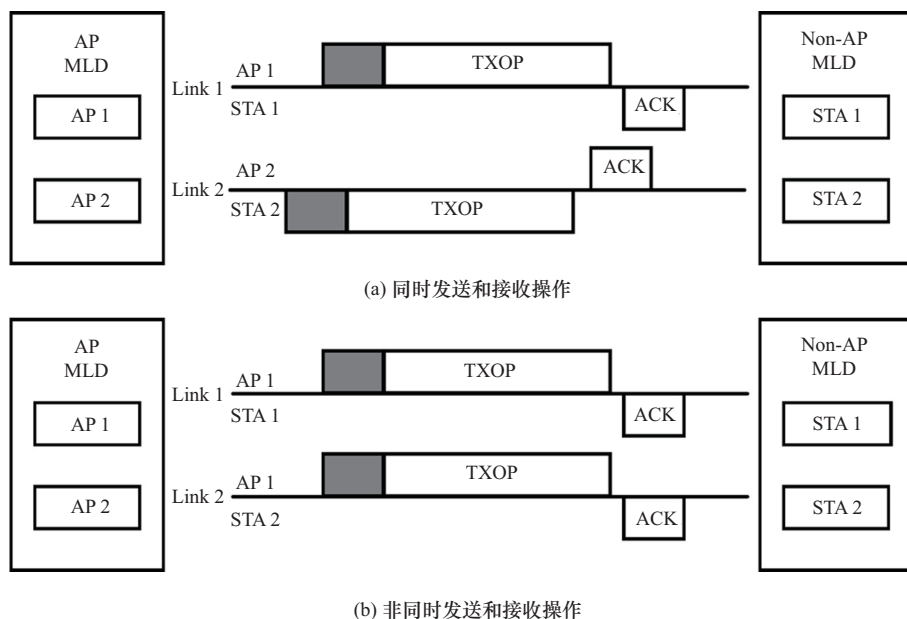
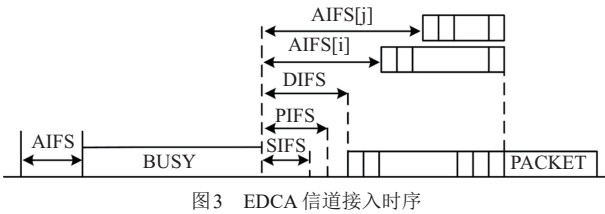
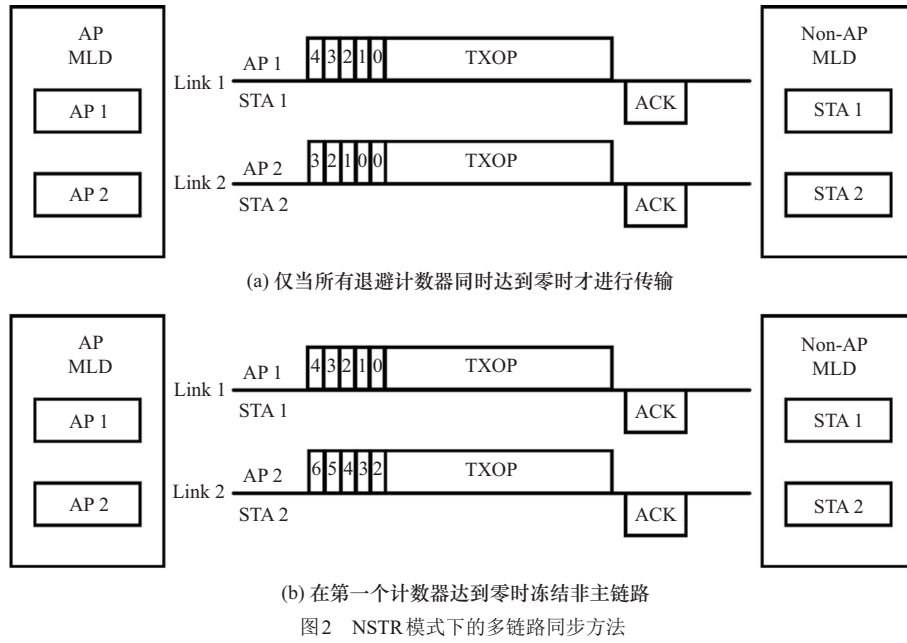


图 1 IEEE 802.11be 中的多链路接入模式



### 1.2 非饱和流量下的马尔可夫分析

本节介绍非饱和多链路 EDCA 的分析建模框架，其中纳入了差异化的 AC、非饱和流量行为以及多链路空间随机性的影响。这些模型为在现实操作条件下分析 IEEE 802.11be 网络奠定了基础，其中队列动态和接入竞争在异构链路之间相互作用。

通过引入一个空闲 (idle) 状态来扩展经典的 EDCA 模型，以捕获退避计数器达到零时传输队列为空的退避后条件。数据包到达被建模为独立的泊松过程，反映了实际网络中流量的随机性。此外，本文将每个 AC 与一个不同的数据速率相关联，以表示服务差异化，这与它们在 IEEE 802.11e 标准中分配的优先级一致。

由于 AIFSN 的差异化，本文为低优先级和高优先级 AC 构建了不同的马尔可夫链。对于最低优先级 AC<sub>0</sub> (即 AC[BK])，明确地建模了退避计数器冻结机制，即当检测到更高优先级的传输时，AC<sub>0</sub> 计数器被暂停，并且只有在信道被检测为空闲满 AIFS<sub>0</sub> 持续时间后才恢复。

为了捕获这种行为，本文定义了一个三维离散时间马尔可夫链，低优先级 AC[BK] 队列的马尔可夫链如图 4 所示。状态表示为  $(i, k, \theta)$ ，其中  $i \in [0, m]$  是退避阶段 ( $m$  是最大重试限制)， $k \in [0, W_{0,i} - 1]$  是退避计数器值， $\theta \in \{0, 1\}$  表示计数器是活跃 ( $\theta = 0$ ) 还是冻结 ( $\theta = 1$ )。阶段  $i$  的竞争窗口定义为  $W_{0,i} = 2^i W_{0,0}$ 。引入了一个额外的 idle 状态来表示当退避计数器达到零时缓冲区为空的情况。完整的单步转移概率集如式(1)所示。

$$\begin{cases}
 P \{ (i, k, 0) | (i, k + 1, 0) \} = p_1 \\
 P \{ (i, k, 1) | (i, k + 1, 0) \} = 1 - p_1 \\
 P \{ (i, k, 0) | (i, k, 1) \} = p_2 \\
 P \{ (i, k, 1) | (i, k, 1) \} = 1 - p_2 \\
 P \{ (0, k, 1) | (i, 0, 0) \} = \frac{q_0 (2k + 1) (1 - p_{out,0})}{W_{0,0}^2} \\
 P \{ (i, k, 1) | (i - 1, 0, 0) \} = \frac{(2k + 1) p_{out,0}}{W_{0,i}^2} \\
 P \{ (m, k, 1) | (m, 0, 0) \} = \frac{(2k + 1) p_{out,0}}{W_{0,m}^2} \\
 P \{ idle | (i, 0, 0) \} = (1 - q_0) (1 - p_{out,0}) \\
 P \{ idle | idle \} = 1 - q_0 \\
 P \{ (0, k, 1) | idle \} = \frac{q_0 (2k + 1)}{W_{0,0}^2}
 \end{cases} \quad (1)$$

马尔可夫链在各种竞争和传输条件下的行为逻辑由式(1)中的转移概率概括，解释如下。

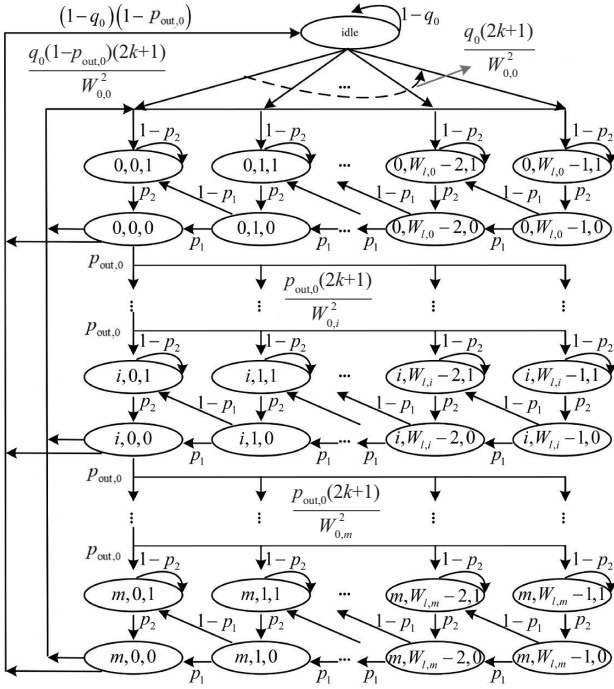


图4 低优先级 AC[BK] 队列的马尔可夫链

1) 当高优先级 AC 启动传输时,  $AC_0$  退避计数器被冻结, 系统进入等待状态  $(i, k, 1)$ 。如果在随后的 AIFS 期间没有发生高优先级传输,  $AC_0$  的退避过程以概率  $p_2$  恢复, 转换到状态  $(i, k, 0)$ 。

2) 相反, 如果高优先级活动持续存在, 系统以概率  $1 - p_2$  保持在冻结状态  $(i, k, 1)$ 。

3) 在竞争期间, 如果信道被检测为空闲, 退避计数器以概率  $p_1$  递减, 从  $(i, k + 1, 0)$  转换到状态  $(i, k, 0)$ 。

4) 如果信道繁忙, 退避过程以概率  $1 - p_1$  保持暂停, 停留在状态  $(i, k + 1, 0)$ 。

5) 在状态  $(i, 0, 0)$  成功传输后, 如果缓冲区中存在新数据包且未发生外部碰撞, 系统以概率  $\frac{q_0(2k+1)(1-p_{out,0})}{W_{0,0}^2}$  转换到初始退避状态  $(0, k, 1)$ 。

6) 如果在退避阶段  $i - 1$  的传输过程中发生外部碰撞, 站点以概率  $\frac{(2k+1)p_{out,0}}{W_{0,i}^2}$  前进到退避阶段  $i$ 。

7) 如果在最大退避阶段  $m$  传输失败, 站点以概率  $\frac{(2k+1)p_{out,0}}{W_{0,m}^2}$  保持在阶段  $m$  并进行新的随机退避。

8) 如果成功传输后传输队列为空 (即没有数据包到达), 系统以概率  $(1 - q_0)(1 - p_{out,0})$  从  $(i, 0, 0)$  转换到 idle 状态。

9) 如果系统已处于 idle 状态且没有新数据包到达, 它以概率  $1 - q_0$  保持 idle。

10) 在 idle 状态期间数据包到达时, 系统以概率  $\frac{q_0(2k+1)}{W_{0,0}^2}$  进入新的初始退避状态。

在式 (1) 中, 索引  $i$  和  $k$  分别在  $i \in [0, m]$  和  $k \in [0, W_{0,i} - 1]$  范围内。概率  $p_1$  表示在给定时间槽内, 4 个 AC 中没有任何一个传输数据包的可能性; 而  $p_2$  表示没有来自高优先级队列 (即  $AC_1$ 、 $AC_2$ 、 $AC_3$ ) 的传输发生的概率。术语  $p_{out,0}$  对应于  $AC_0$  数据包所经历的外部碰撞概率, 而  $q_0$  表示  $AC_0$  的数据包到达概率。

基于底层马尔可夫链模型, 传输就绪状态  $(0, i, k, 0)$  和退避冻结状态  $(0, i, k, 1)$  的稳态概率推导如下。

$$\beta_{0,i,k,0} = \frac{(W_{0,i} - k)(2k + 1)}{W_{0,i}} \beta_{0,i,0,0}$$

$$\beta_{0,i,k,1} = \frac{W_{0,i} - k - p_1(W_{0,i} - k - 1)(2k + 1)}{p_2 W_{0,i}} \beta_{0,i,0,0} \quad (2)$$

其中,  $i \in [0, m]$ 。

此外, 参考状态  $(0, i, 0, 0)$  和  $(0, i - 1, 0, 0)$  之间的递归关系由式 (3) 给出, 即

$$\beta_{0,i,0,0} = \frac{p_{out,0}}{W_{0,i}} \beta_{0,i-1,0,0}, \quad 0 < i < m \quad (3)$$

在阶段  $i = 0$ , 处于状态  $(0, k, 0)$  的稳态概率, 即低优先级队列在非饱和状态下以计数器值  $k$  启动退避的概率为

$$\beta_{0,0,k,0} = \frac{q_0(W_{0,0} - k)(1 - p_{out,0})(2k + 1)}{W_{0,0}^2} + \sum_{i=0}^m \beta_{0,i,0,0} + \frac{q_0(W_{0,0} - k)(2k + 1)}{W_{0,0}^2} \beta_{idle} \quad (4)$$

根据式 (1)、式 (2), 进入 idle 状态 (即缓冲区中没有数据包且计数器不活跃) 的稳态概率为

$$\beta_{idle} = \frac{(1 - p_{out,0})(1 - q_0)}{q_0} \sum_{i=0}^m \beta_{0,i,0,0} \quad (5)$$

在最大重试阶段  $i = m$ , 概率  $\beta_{0,m,0,0}$  为

$$\beta_{0,m,0,0} = \frac{p_{out,0}}{W_{0,m} - p_{out,0}} \beta_{0,m-1,0,0} \quad (6)$$

通过对所有系统状态应用归一化条件, 得到

$$\beta_{0,0,0,0} = \left[ \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\left( L_1 W_{0,i}^2 + L_2 W_{0,i} + L_3 + \frac{L_4}{W_{0,i}} \right) p_{out,0}^i}{\prod_{j=1}^i W_{0,j}} + L_{m'} + \frac{(1-p_{out,0})(1-q_0)}{q_0} \sum_{i=0}^m \frac{p_{out,0}^i}{\prod_{j=1}^i W_{0,j}} \right]^{-1} \quad (8)$$

其中常数  $L_{m'}$  定义为

$$L_{m'} = \frac{\xi_m p_{out,0}^m}{(W_{0,m} - p_{out,0}) \prod_{j=1}^{m-1} W_{0,j}} \quad (9)$$

对于高优先级接入类别, 即  $AC_1$  (尽力而为型)、 $AC_2$  (视频) 和  $AC_3$  (语音), 其非饱和退避行为通过在传统饱和马尔可夫链的基础上增加一个额外的 idle 状态来进行建模。这种扩展捕获了传输队列为空的可能性, 从而反映了真实的流量条件。高优先级队列的马尔可夫链模型:  $AC_1$ (BE)、 $AC_2$ (VI) 和  $AC_3$ (VO) 如图 5 所示。

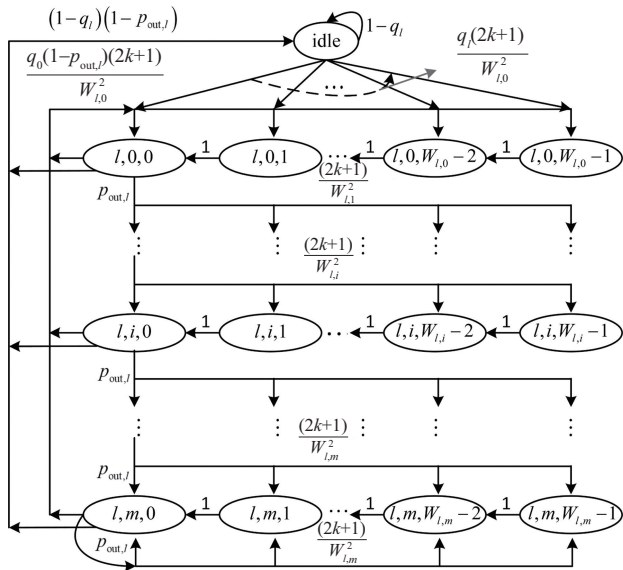


图 5 高优先级队列的马尔可夫链模型:  $AC_1$ (BE)、 $AC_2$ (VI) 和  $AC_3$ (VO)

马尔可夫链中的每个状态由一个元组  $(i, k)$  定义, 其中  $i \in [0, m]$  表示重传阶段,  $k \in [0, W_{l,i} - 1]$  是当前的退避计数器值。在阶段  $i$  时,  $AC_l$  ( $l \in 1, 2, 3$ ) 的竞争窗口  $W_{l,i}$  计算为  $W_{l,i} = 2^i W_{l,0}$ , 其中  $W_{l,0}$  是  $AC_l$  的初始竞争窗口。

与低优先级  $AC_0$  模型不同, 高优先级队列的马尔可夫链不需要一个显式状态来表示计数器冻结,

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_{0,i}-1} (\beta_{0,i,k,0} + \beta_{0,i,k,1}) + \beta_{idle} = 1 \quad (7)$$

$\beta_{0,0,0,0}$  的闭合形式表达式推导为

因为它们的竞争过程不会被低优先级流量抢占。该模型的一步转移概率如式(10)所示。

$$\begin{cases} P\{(l,i,k) | (l,i,k+1)\} = 1 \\ P\{(l,0,k) | (l,i,0)\} = \frac{q_l(2k+1)(1-p_{out,l})}{W_{l,0}^2} \\ P\{(l,i,k) | (l,i-1,0)\} = \frac{(2k+1)p_{out,l}}{W_{l,i}^2} \\ P\{(l,m,k) | (l,m,0)\} = \frac{(2k+1)p_{out,l}}{W_{l,m}^2} \\ P\{idle | (l,i,0)\} = (1-q_l)(1-p_{out,l}) \\ P\{idle | idle\} = 1 - q_l \\ P\{(l,0,k) | idle\} = \frac{q_l(2k+1)}{W_{l,0}^2} \end{cases} \quad (10)$$

与饱和情况相比, 非饱和马尔可夫模型引入了几个关键的状态转移, 以更准确地反映队列动态。

1) 在成功传输数据包、无外部碰撞且缓冲区为空后, 站点以概率  $(1-q_l)(1-p_{out,l})$  转移到 idle 状态。

2) 当一个新数据包在 idle 状态到达时, 站点以概率  $\frac{q_l(2k+1)}{W_{l,0}^2}$  进入初始退避状态。

3) 如果在下一个时间槽内没有数据包到达, 站点以概率  $1 - q_l$  保持在 idle 状态。

通过应用式(10)并利用链式法则, 可以得到在非饱和条件下, 一个高优先级接入类别  $AC_l$  中的数据包处于第  $i$  个重传阶段且退避计数器值为零的稳态概率  $\alpha_{l,i,0}$  为

$$\alpha_{l,i,0} = \frac{p_{out,l}}{W_{l,i}} \alpha_{l,i-1,0}, \quad 1 \leq i \leq m \quad (11)$$

相应地, 一个数据包在初始退避阶段 ( $i = 0$ ) 开始且计数器为零的稳态概率  $\alpha_{l,0,0}$  为

$$\alpha_{l,0,0} = \frac{1-p_{out,l}}{W_{l,0}} \sum_{i=0}^m \alpha_{l,i,0} \quad (12)$$

对于最终退避阶段 ( $i = m$ ), 稳态概率变为

$$\alpha_{l,m,0} = \frac{p_{out,l}}{W_{l,m} - p_{out,l}} \alpha_{l,m-1,0} \quad (13)$$

进入 idle 状态 (即退避计数器为零且没有排队等待传输的数据包) 的稳态概率  $\alpha_{idle}$  表示为

$$\alpha_{l,0,0} = \left[ \sum_{i=0}^{m-1} \left( \frac{W_{l,i}^2}{3} + \frac{W_{l,i}}{2} - \frac{5}{6} \right) \frac{p_{out,l}^i}{\prod_{j=1}^i W_{l,j}} + \frac{L_m''(1-q_l)(1-p_{out,l})}{q_l} \sum_{i=0}^m \frac{p_{out,l}^i}{\prod_{j=1}^i W_{l,j}} \right]^{-1} \quad (16)$$

其中系数  $L_m''$  表达式为

$$L_m'' = \frac{\left( \frac{W_{l,m}^2}{3} + \frac{W_{l,m}}{2} - \frac{5}{6} \right) p_{out,l}^m}{(W_{l,m} - p_{out,l}) \prod_{j=1}^m W_{l,j}} \quad (17)$$

在上述表达式中,  $q_l$  表示  $AC_l$  的数据包到达概率,  $p_{out,l}$  代表了来自该接入类别的数据包遇到的外部碰撞概率。

来自接入类别  $AC_l$  的数据包在任意退避阶段被传输的概率  $\tau_l$  可以表示为

$$\tau_l = \sum_{i=0}^m \alpha_{l,i,0} = \frac{W_{l,0} \alpha_{l,0,0}}{1 - p_{out,l}}, \quad l \in 1, 2, 3 \quad (18)$$

值得注意的是, 当  $q_l \rightarrow 1$  时, 系统行为趋近于饱和网络。在此极限下, 非饱和传输概率  $\tau_l$  收敛到饱和情况下的值, 从而验证了该模型与现有理论结果的一致性。

$$\alpha_{idle} = \frac{(1 - q_l)(1 - p_{out,l})}{q_l} \sum_{i=0}^m \alpha_{l,i,0} \quad (14)$$

应用归一化条件表达式为

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_{l,i}-1} \alpha_{l,i,k} + \alpha_{idle} = 1 \quad (15)$$

推导出  $\alpha_{l,0,0}$  的闭合形式表达式为

## 2 考虑捕获效应的性能分析

### 2.1 捕获模型与传输成功概率

以往关于 EDCA 建模的研究通常假设竞争站点的空间分布遵循均匀分布。然而, 这一假设过于理想化, 未能准确捕捉现实世界多链路部署场景中固有的随机性。为了更真实地反映空间节点分布的随机特性并增强模型的实际适用性, 本节采用泊松点过程 (PPP) 来对多链路竞争者的空间分布进行建模。

基于泊松点过程的 AP MLD 和非 AP MLD 的空间分布模型如图 6 所示。为便于分析, 假设信道条件理想, 不考虑信道错误或隐藏终端效应。在这个二维部署场景中, 所有竞争的多链路节点集合构成一个密度为  $\rho$  的空间点过程, 遵循齐次泊松点过程 (homogeneous PPP)。

由图 6 可以看出, AP MLD 的空间分布被建模

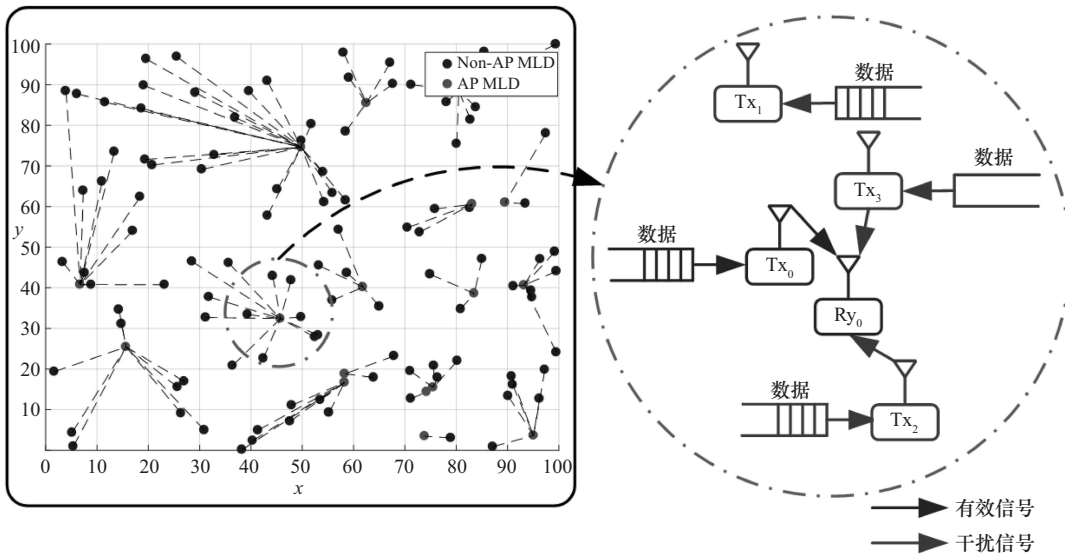


图 6 基于泊松点过程的 AP MLD 和非 AP MLD 的空间分布模型

为二维平面上空间 PPP  $\Phi = \{x_n\}$  的一次实现，其中每个  $x_n$  表示第  $n$  个 AP MLD 的空间坐标。每个 AP MLD 位于一个半径为  $R$  的圆形区域的中心，在该区域内随机分布着  $n$  个非 AP MLD。

考虑一个距离其服务 AP 为  $r_0$  的非 AP MLD。令  $h_0$  表示小尺度衰落增益（通常建模为瑞利衰落）， $\alpha > 2$  为路径损耗指数， $P_t$  为发射功率。AP 接收到的有用信号功率  $P_u$  为

$$P_u = h_0 r_0^{-\alpha} P_t \quad (19)$$

在给定的观察时隙内，假设有  $j$  个竞争节点的退避计数器同时达到零。从这些干扰节点接收到的总干扰功率  $I$  表示为

$$I = \sum_{x \in \Phi} h_x r_x^{-\alpha} P_t \quad (20)$$

其中， $h_x$  和  $r_x$  分别表示从干扰节点  $x \in \Phi$  到 AP 的信道衰落增益和距离。为便于分析，忽略热噪声，接收端的瞬时信干比 (SIR)  $\gamma$  表达式为

$$\gamma = \frac{P_u}{I} = \frac{h_0 r_0^{-\alpha}}{\sum_{x \in \Phi} h_x r_x^{-\alpha}} \quad (21)$$

假设数据包捕获阈值为  $z_0$ ，这是一个由调制方案和接收机灵敏度决定的常数，只有当瞬时 SIR  $\gamma$  超过  $z_0$  时，接收机才能成功捕获数据包。因此，捕获概率  $P_{cp}$  可以表示为

$$P_{cp} = \mathbb{P}(\gamma > z_0) = \mathbb{P}\left(\sum_{x \in \Phi} h_x r_x^{-\alpha} < \frac{h_0 r_0^{-\alpha}}{z_0}\right) \quad (22)$$

其中， $h_x$  是干扰发射机与 AP 之间的瑞利衰落增益， $r_x$  是干扰节点  $x$  与 AP 之间的距离。为了评估  $P_{cp}$ ，首先使用拉普拉斯变换分析总干扰  $Q = \sum_{x \in \Phi} h_x r_x^{-\alpha}$  的分布，即

$$\mathcal{L}_Q(s) = \mathbb{E}_\Phi \left[ \prod_{x \in \Phi} \mathbb{E}_{h_x} \left[ \exp(-s h_x r_x^{-\alpha}) \right] \right] \quad (23)$$

假设  $h_x \sim \exp(1)$ （即单位均值的指数分布），并将  $\Phi$  建模为强度为  $\rho$  的齐次 PPP，利用 PPP 的概率生成泛函 (PGFL)，即

$$\mathbb{E} \left[ \prod_{x \in \Phi} f(x) \right] = \exp \left( -\rho \int_{\mathbb{R}^2} (1 - f(x)) dx \right) \quad (24)$$

可得

$$\mathcal{L}_Q(s) = \exp \left( -\rho \int_{\mathbb{R}^2} \left( 1 - \frac{1}{1 + s r^{-\alpha}} \right) dx \right) \quad (25)$$

对于较大的  $R$ ，在极坐标下进行积分可得

$$\mathcal{L}_Q(s) = \exp \left( -2\pi\rho \int_0^\infty \left( 1 - \frac{1}{1 + s r^{-\alpha}} \right) r dr \right) \quad (26)$$

利用瑞利衰落下干扰拉普拉斯泛函的标准结果<sup>[26]</sup>，得到

$$\mathcal{L}_Q(s) = \exp \left( -\rho\pi\Gamma \left( 1 - \frac{2}{\alpha} \right) s^{\frac{2}{\alpha}} \right) \quad (27)$$

当  $\alpha = 4$  时，拉普拉斯变换简化为

$$\mathcal{L}_Q(s) = \exp \left( -\rho\pi^{\frac{3}{2}} s^{\frac{1}{2}} \right) \quad (28)$$

应用拉普拉斯逆变换， $Q$  的概率密度函数 (PDF) 表达式为

$$f_Q(x) = \frac{\rho\pi}{2x^{\frac{3}{2}}} \exp \left( -\frac{\rho^2\pi^3}{4x} \right) \quad (29)$$

因此，捕获概率为

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \mathbb{P} \left( Q < \frac{1}{r_0^4 z_0} \right) = \\ &= \int_0^{\frac{1}{r_0^4 z_0}} \frac{\rho\pi}{2x^{\frac{3}{2}}} \exp \left( -\frac{\rho^2\pi^3}{4x} \right) dx = \\ &= 2 - 2\Phi \left( \rho\pi^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{r_0^4 z_0}{2}} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

其中， $\Phi(x)$  表示标准高斯累积分布函数，表达式为

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (31)$$

在给定的观察时隙内，令  $R_{j,l}$  表示一个多链路竞争点成功地从其  $AC_l$  队列传输一个数据包，而恰好有  $j$  个其他竞争点（干扰者）也尝试传输但失败的概率。该概率为

$$R_{j,l} = n \binom{n-1}{j} \tau_l \tau_j^j \prod_{x=0}^3 (1 - \tau_x)^{n-j-1} \quad (32)$$

其中， $\tau = \sum_{l=1}^3 \tau_l$  是一个多链路站点从任意高优先级

接入类别传输一个数据包的总概率，而  $\binom{n-1}{j}$  表示从剩余的  $n-1$  个竞争者中选择  $j$  个干扰站点的组合数。

基于捕获模型，如果 SIR  $\gamma$  超过捕获阈值  $z_0$ ，则来自  $AC_l$  的传输被认为是成功的。因此，一个来自  $AC_l$  的数据包被成功捕获的概率为

$$P_{\text{cap},l} = \sum_{j=1}^{n-1} R_{j,l} \cdot P_{\text{cp}}(\gamma > z_0) \quad (33)$$

考虑到捕获效应, 一个满足  $\gamma > z_0$  的多链路站点可以成功占用信道, 而其他站点则经历外部碰撞并进行退避。假设外部碰撞事件是独立的, 非饱和

$$P_{\text{out},l} = \begin{cases} 1 - (1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq l} (1 - \tau_x)^n - P_{\text{cap},l}, & \text{无干扰} \\ \left[ 1 - (1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq 0,l} (1 - \tau_x)^n \right] P_B + \left[ 1 - (1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq l} (1 - \tau_x)^n \right] P_I - P_{\text{cap},l}, & \text{有干扰} \end{cases} \quad (34)$$

$$P_{s,l} = \begin{cases} n\tau_l(1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq l} (1 - \tau_x)^n + P_{\text{cap},l}, & \text{无干扰} \\ n\tau_l(1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq 0,l} (1 - \tau_x)^n P_B + n\tau_l(1 - \tau_l)^{n-1} \prod_{x \neq l} (1 - \tau_x)^n P_I + P_{\text{cap},l}, & \text{有干扰} \end{cases} \quad (35)$$

其中, 干扰指来自其他非目标传输对当前  $\text{AC}_l$  传输过程的信号干扰, 会导致数据包传输失败或捕获概率变化, 是分析信道占用和传输成功率时需要考虑的关键因素。

系统级的信道状态概率, 即信道空闲概率  $P_I$  和信道忙碌概率  $P_B$ , 取决于所有站点的聚合传输行为。具体来说, 令  $p_1 = \prod_{l=0}^3 (1 - \tau_l)^n$  表示没有站点传输的概率, 令  $p_2 = \prod_{l=1}^3 (1 - \tau_l)^n$  表示没有高优先级站点 (即  $\text{AC}_1$  到  $\text{AC}_3$ ) 传输的概率。  $P_I$ 、 $P_B$  与这些量之间的关系为

$$\begin{cases} P_I = p_2 P_B + p_1 P_I \\ P_B = 1 - P_I \end{cases} \quad (36)$$

总的成功传输概率定义为各队列传输成功概率

$$\begin{cases} T_{s,l}^{\text{bas}} = H_l + \mathbb{E}[P] + \text{SIFS} + 2\delta + \text{ACK} + \text{AIFS}_{\text{min},l} \\ T_{c,l}^{\text{bas}} = H_l + \mathbb{E}[P] + \text{AIFS}_{\text{min},l} + \delta \\ T_{s,l}^{\text{rts}} = H_l + \mathbb{E}[P] + 3\text{SIFS} + 4\delta + \text{ACK} + \text{AIFS}_{\text{min},l} + \text{CTS} + \text{RTS} \\ T_{c,l}^{\text{rts}} = \text{RTS} + \text{AIFS}_{\text{min},l} + \delta \end{cases} \quad (40)$$

其中,  $H_l$  表示队列  $\text{AC}_l$  的 MAC 和 PHY 头部长度,  $\mathbb{E}[P]$  是平均载荷大小,  $\delta$  是基本时隙的持续时间, 常量 RTS、CTS、SIFS 和 ACK 代表各自控制帧和帧间间隔的标准持续时间。

## 2.2 吞吐量与时延分析

在非饱和条件下, 归一化吞吐量受捕获效应、竞争 MLD 的密度、AP 覆盖半径和捕获阈值的共同影响。对于给定的接入类别  $\text{AC}_l$ , 其吞吐量为

$$S_l = \frac{P_{s,l} \mathbb{E}[P]}{\%} P_I \delta + P_{s,l} T_{s,l} + P_c T_{c,l} \quad (41)$$

网络中  $\text{AC}_l$  的外部碰撞概率  $p_{\text{out},l}$  如式(34)所示, 其中  $P_B$  和  $P_I$  分别表示信道忙碌概率和信道空闲概率。最后, 从  $\text{AC}_l$  队列成功传输的概率  $P_{s,l}$  对应于恰好有一个站点从  $\text{AC}_l$  传输, 且没有其他站点从任何其他 AC 并发传输的事件, 其表达式如式(35)所示。

之和, 即

$$P_s = \sum_{l=0}^3 P_{s,l} \quad (37)$$

信道碰撞的概率, 记为  $P_c$ , 则通过剩余概率计算得出

$$P_c = 1 - P_I - P_s \quad (38)$$

假设数据包到达遵循泊松过程, 在非饱和网络中, 给定时间槽内队列  $\text{AC}_l$  的数据包到达概率  $q_l$  为

$$q_l = 1 - \left[ p_s e^{-\lambda_l T_s} + (1 - p_b) e^{-\lambda_l T_c} + (p_b - p_s) e^{-\lambda_l T_e} \right] \quad (39)$$

其中,  $\lambda_l$  表示  $\text{AC}_l$  的泊松到达率,  $T_s$ 、 $T_c$  和  $T_e$  分别代表成功传输、碰撞事件和空闲时间槽的平均持续时间。注意,  $T_e$  对应于基本时隙时间  $\delta$ 。  $T_s$  和  $T_c$  的持续时间取决于底层的信道接入机制。具体来说, 这些持续时间的表达式为

其中,  $\mathbb{E}[P]$  是平均载荷,  $\delta$  是时隙时间,  $T_{s,l}$  和  $T_{c,l}$  分别是成功传输和碰撞的平均持续时间,  $P_I$ 、 $P_{s,l}$ 、 $P_c$  是 2.1 节中推导出的空闲、成功和碰撞概率。总的归一化吞吐量为  $S = \sum_l S_l$ 。

每个  $\text{AC}_l$  队列的数据包到达被建模为速率  $\lambda_l$  的独立泊松过程; 服务时间服从均值为  $1/\mu_l$  的指数分布。由于缓冲区大小有限, 为  $K$ , 因此每个队列是一个  $M/M/1/K$  系统, 其流量强度为  $\rho_l = \frac{\lambda_l}{\mu_l}$ 。

令  $p_{i,l}$  为队列中包含  $i$  个数据包的概率。根据  $M/M/1/K$  理论, 得到稳态概率为

$$p_{0,l} = \frac{1 - \rho_l}{1 - \rho_l^{K+1}}, \quad p_{i,l} = \rho_l^i p_{0,l}, \quad 1 \leq i \leq K \quad (42)$$

系统中的平均数据包数量为

$$\mathbb{E}[L_{l,q}] = \frac{\rho_l}{1 - \rho_l} - \frac{(K+1)\rho_l^{K+1}}{1 - \rho_l^{K+1}} \quad (43)$$

相应的平均等待时间为

$$\mathbb{E}[W_{l,q}] = \frac{\mathbb{E}[L_{l,q}]}{\lambda_l(1 - p_{K,l})} - \frac{1}{\mu_l} \quad (44)$$

其中,  $p_{K,l} = \rho_l^K p_{0,l}$  是阻塞概率。

$AC_l$  的平均 MAC 服务时间为

$$\mathbb{E}[T_{ser,l}] = \mathbb{E}[X_l]\sigma + \mathbb{E}[M_l](T_{c,l} + T_o) + T_{s,l} + \mathbb{E}[F_l] \left[ \frac{P_S}{P_B} T_{s,l} + \frac{P_B - P_S}{P_B} T_{c,l} \right] \quad (45)$$

其中, 有

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_l] &= \sum_{i=0}^m \frac{p_{out,l}^i - p_{out,l}^{m+1}}{1 - p_{out,l}^{m+1}} \frac{2W_{li}^2 - 2}{6W_{li}} \\ \mathbb{E}[M_l] &= \sum_{i=0}^m i p_{out,l} (1 - p_{out,l})^{i-1} \\ \mathbb{E}[F_l] &= \frac{p_{out,l} \mathbb{E}[X_l]}{1 - p_{out,l}} \end{aligned} \quad (46)$$

且  $T_o = \text{SIFS} + \text{ACK}_{\text{Timeout}}$  是重传超时时间间隔。因此, 服务速率为  $\mu_l = \frac{1}{\mathbb{E}[T_{ser,l}]}$ 。

式(43)~式(46)量化了在非饱和多链路操作下, 竞争参数、捕获概率和流量负载如何共同决定每个接入类别的排队时延和吞吐量。

### 3 数值结果

本节通过数值仿真来评估本文分析模型的准确

性和有效性。所考虑的场景对应于一个非饱和的多链路 EDCA 网络, 其中  $n$  个多链路站点随机分布在一个多链路 AP 的覆盖区域内。覆盖区域被假定为半径为  $R$  的圆形区域, 竞争站点的空间分布遵循密度为  $\rho$  的 PPP。接入类别  $AC_l$  根据平均数据到达率为  $\lambda_l$  Mbit/s 的泊松过程独立生成流量。数据包传输过程采用前文介绍的排队论框架进行建模, 其中每个队列的有限缓冲区容量为  $K = 50$  个数据包。无线信道使用路径损耗指数  $\alpha = 4$  进行建模, 并在不同的部署密度和阈值设置下评估捕获效应。整个评估过程中使用的所有仿真参数如表 1 所示。

基于泊松点过程的 AP MLD 和非 AP MLD 的空间分布模型如图 7 所示。图 7(a)展示了在空间随机(基于 PPP)部署模型下, 捕获概率  $P_{cp}$  与 AP-MLD 覆盖半径之间的关系。当非 AP MLD 的部署密度保持固定时, 覆盖半径的增大会导致  $P_{cp}$  显著下降。这主要是由于信号衰减和干扰的累积效应随距离增加而增强。在实际场景中, 更远的距离通常对应着更弱的接收信号功率, 以及更容易受到来自相邻发射机和环境障碍物的干扰。这些效应降低了在接收端满足捕获阈值的可能性, 当距离超过操作范围时,  $P_{cp}$  收敛到零, 使捕获机制失效。

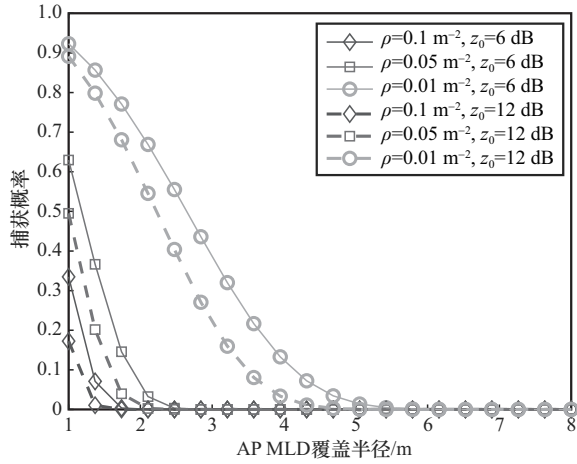
图 7(b)显示了在不同捕获阈值设置  $z_0$  下, 捕获成功概率  $P_{cap,l}$  作为非 AP MLD 部署密度  $\rho$  的函数变化情况。根据式(33)的定义,  $P_{cap,l}$  代表了碰撞事件发生且目标信号在此过程中被成功捕获的联合概率。结果表明,  $P_{cap,l}$  表现出非单调行为。在极低密度下, 由于碰撞事件罕见,  $P_{cap,l}$  趋近于零。随着密度增加, 由于更频繁的竞争, 它随之上升, 在因干扰加剧而导致节点密度增加之前达到峰值, 然后下降。在极高密度下, 捕获成功概率趋于消失。此外, 随着阈值  $z_0$  的增加, 该概率会降低, 这反映了更严格的阈

表 1 仿真参数

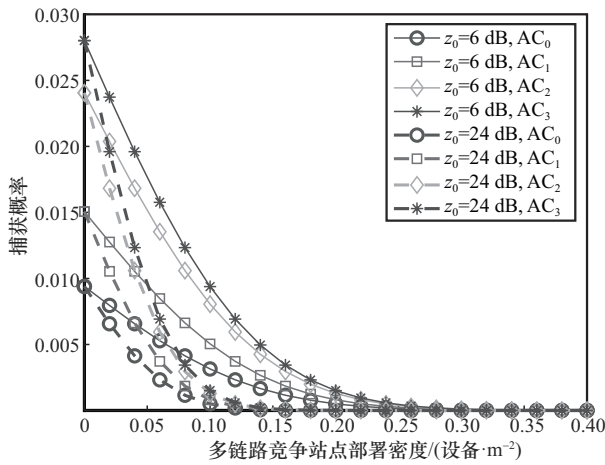
参数	值	参数	值
链路数量	2	每链路信道带宽/MHz	20
数据包载荷/bit	8 184	SIFS/ $\mu$ s	28
MAC 头部/bit	272	AIFSN	{7, 3, 2, 2}
PHY 头部/bit	128	CW <sub>min</sub>	{8, 16, 32, 32}
ACK/bit	112 + PHY	CW <sub>max</sub>	{128, 256, 1 024, 1 024}
RTS/bit	160 + PHY	CTS/bit	112 + PHY
时隙时间/ $\mu$ s	50	ACK 超时/bit	112 + PHY

值更难满足,特别是在信干比一般的条件下。具有更好捕获能力的设备(例如,增强的硬件或有利的调制编码方案)在相同阈值下表现出更高的  $P_{cap,l}$ , 突显了捕获效应对部署条件和物理层参数的敏感性。

信号(通常来自附近或功率更高的发射机)即使在存在并发传输的情况下也能被成功解码,有效地减轻了同时接入尝试带来的负面影响,并提高了整体信道利用率。



(a) 捕获概率与 AP-MLD 覆盖半径的关系



(b) AC1 的捕获概率与非 AP-MLD 密度的关系

图7 基于泊松点过程的 AP-MLD 和非 AP-MLD 的空间分布模型

在非饱和条件下,每个 AC 的外部碰撞概率  $p_{out,l}$  与数据包传输速率之间的关系如图8所示,此外,图8还比较了有无捕获效应的场景。在低传输速率下,由于信道可用性充足且竞争最小,所有 AC 的碰撞概率都保持在相对较低且几乎没有区别的水平。随着传输速率的增加,信道竞争加剧,导致碰撞概率上升。尽管如此,具有最高优先级的 AC<sub>3</sub>, 由于其更小的竞争窗口和更短的 AIFS, 能够更快地接入信道, 因此其碰撞概率明显低于低优先级 AC。

随着传输速率的进一步增加,网络逐渐接近饱和状态,碰撞概率渐进地接近其饱和对应值。引入捕获效应后,碰撞概率出现显著降低,因为更强的

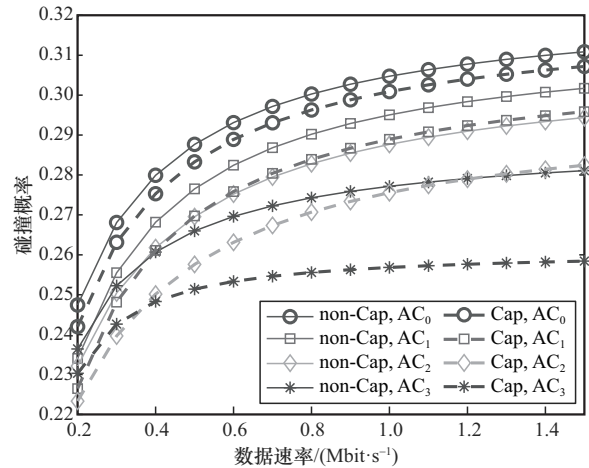


图8 各 AC 的碰撞概率与数据传输速率的关系

从数量上看,当数据速率达到 1.5 Mbit/s 时,捕获效应将 AC<sub>0</sub> 的外部碰撞概率降低了约 1.18%, AC<sub>1</sub> 降低了 1.94%, AC<sub>2</sub> 降低了 4.06%, 而 AC<sub>3</sub> 降低了 8.06%。这一趋势凸显了捕获效应对高优先级流量的更大益处,这类流量通常对时延更敏感且对吞吐量要求更高(例如 VR/AR 应用)。

不同空间部署参数和捕获阈值下碰撞概率的变化如图9所示。图9(a)展示了在捕获效应下,外部碰撞概率  $p_{out,l}$  与 AP-MLD 覆盖半径之间的关系。高优先级 AC 始终表现出较低的碰撞概率,而捕获效应的存在进一步抑制了碰撞的发生。然而,随着覆盖半径的扩大,特别是超过 15 m 后,信号衰减变得严重,降低了成功捕获的可能性。因此,捕获概率趋近于零,  $p_{out,l}$  收敛到没有捕获效应时观察到的值。这些结果表明,对 AP-MLD 进行合理的部署规划,包括优化覆盖半径,对于在密集环境中保持捕获效应的益处并确保高效的介质访问至关重要。

图9(b)展示了变化的非 AP-MLD 部署密度对碰撞概率的影响。在较低密度下(例如  $\rho < 0.25$ ),捕获效应显著减少了外部碰撞,特别是对于高优先级 AC。随着部署密度的增加,干扰加剧,降低了 SINR 并削弱了捕获概率。当密度超过某一阈值时,捕获效应变得可以忽略不计,碰撞概率饱和到与无捕获情况相似的水平。

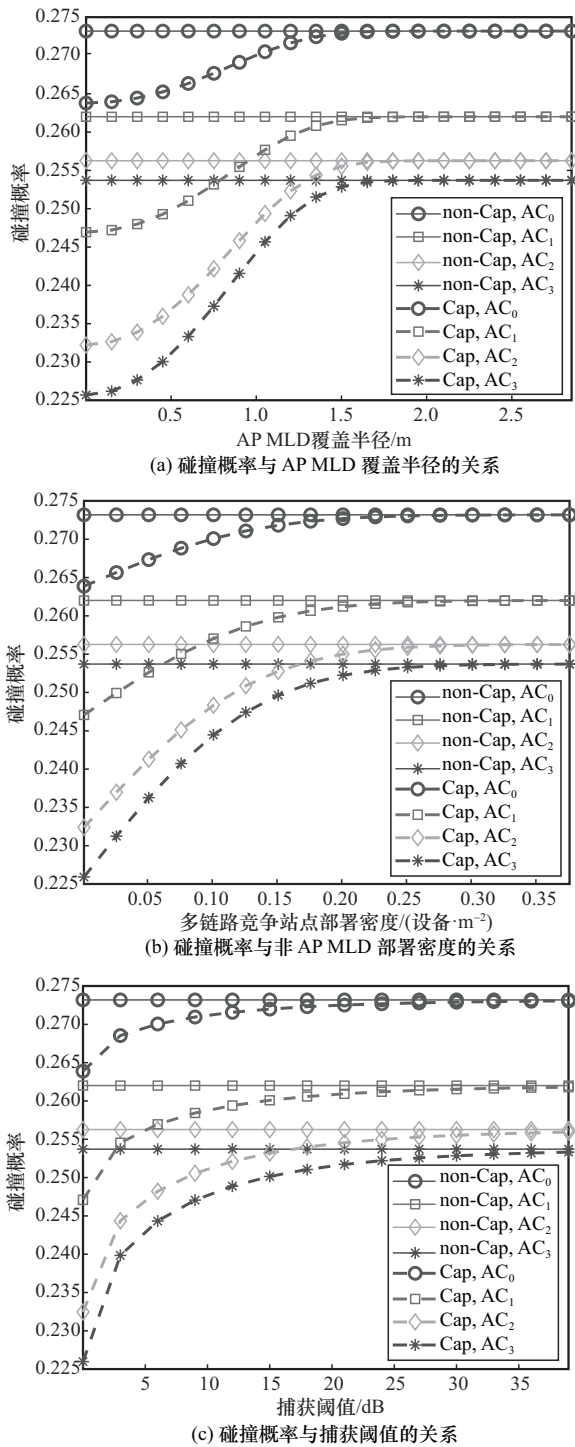


图9 不同空间部署参数和捕获阈值下碰撞概率的变化

图9(c)显示了  $p_{out,l}$  对捕获阈值  $z_0$  的依赖关系。随着  $z_0$  的增加（即更严格的 SINR 要求），满足捕获条件的报文减少，导致更高的碰撞概率。 $p_{out,l}$  的增长在 35 dB 以下更为显著，反映了其对设备级捕获性能变化的敏感性——这通常由硬件设计决定并受老化效应影响。超过此阈值后，大多数站在并发传

输下无法实现捕获，系统行为实际上相当于禁用了捕获功能。

基本接入模式下各 AC 的吞吐量与数据速率的关系如图 10 所示，在低速率时，所有 AC 的吞吐量随业务负载线性增加。然而，随着速率的持续上升，吞吐量增益逐渐减小并最终趋于平稳，表明系统达到饱和。

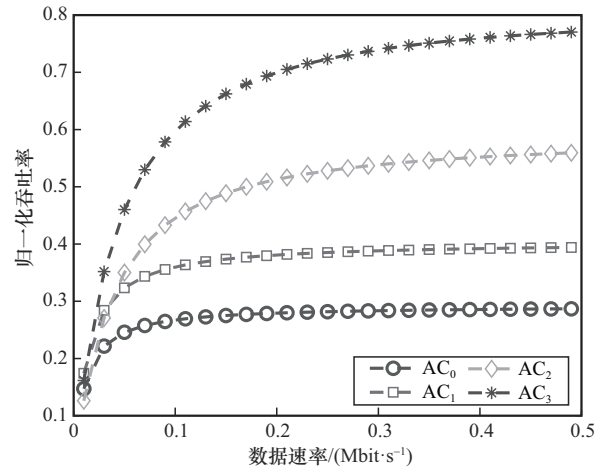


图10 基本接入模式下各AC的吞吐量与数据速率的关系

由于 EDCA 机制定义的基于优先级的竞争参数，不同 AC 的饱和点各不相同。具体来说，AC<sub>0</sub> 在大约 0.2 Mbit/s 时达到饱和，AC<sub>1</sub> 在 0.3 Mbit/s 达到饱和，AC<sub>2</sub> 在 0.4 Mbit/s 达到饱和。相比之下，具有最高优先级和最短竞争窗口的 AC<sub>3</sub>，即使在超过这些点后仍能保持吞吐量增长，尽管增长率很小。其饱和点位于图示范围之外。

这些趋势凸显了 EDCA 在按优先级区分流量方面的有效性：高优先级 AC 不仅在竞争中获得更高的吞吐量，而且表现出更强的抗饱和能力。这种行为确保了映射到高优先级队列的时延或可靠性敏感应用的持续服务质量。

非饱和条件下吞吐量与重传限制次数的关系如图 11 所示。随着重传限制次数的增加，所有 AC 的吞吐量最初都会有所提高，在重传限制次数为 10 左右时达到峰值。这种提升源于额外的重传尝试增加了成功传输的机会。

超过此阈值后，AC<sub>0</sub>、AC<sub>1</sub> 和 AC<sub>2</sub> 的吞吐量开始逐渐下降，最终趋近于零。相比之下，最高优先级类别 AC<sub>3</sub> 在整个重传次数限制范围内都能维持其最大吞吐量。这种差异归因于 EDCA 内在的优先级机制：AC<sub>3</sub> 受益于更短的 AIFS 间隔和更小的竞争窗口，

使其能够主导信道接入, 而低优先级 AC 则因长时间的排队时延而遭受更多的碰撞和缓冲区溢出。

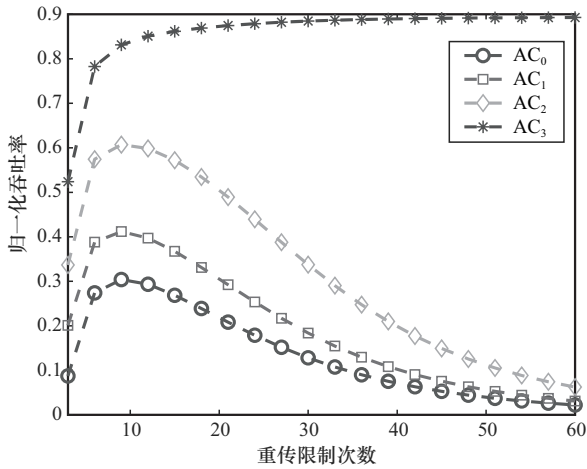


图 11 非饱和条件下吞吐量与重传限制次数的关系

这些结果凸显了在高强度重传策略的环境中, 需要仔细配置 EDCA 参数, 以防止低优先级流量的服务质量下降。为每个 AC 定制重传限制次数和竞争参数有助于在不同流量类别之间平衡吞吐量的公平性和 QoS 保证。

图 12~图 15 展示了在非饱和条件下, 初始竞争窗口大小 ( $W_i$ ) 对每个 AC 吞吐量的影响, 实验设置包含 5 个多链路竞争点和固定的 7 次重传限制。

由图 12 可以看出, 增加  $W_0$  导致  $AC_0$  的吞吐量急剧下降 93.1%, 而  $AC_1$ 、 $AC_2$  和  $AC_3$  的吞吐量分别温和下降 10%、6.8% 和 3.7%。这反映了由于  $AC_0$  的退避间隔较大, 其传输机会减少, 而来自  $AC_0$  的竞争减少对其他 AC 略有好处。

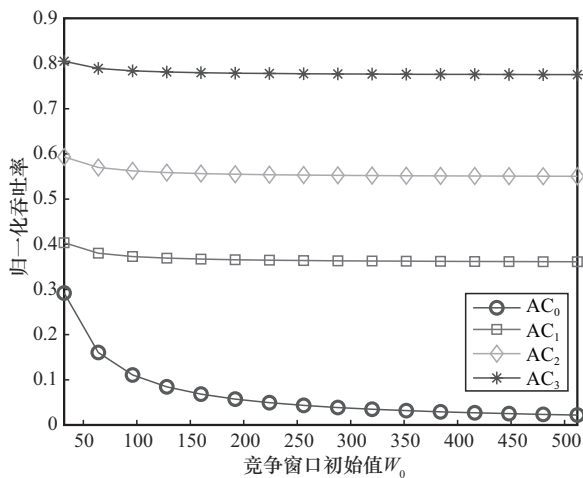


图 12 非饱和条件下  $AC_0$  的吞吐量与初始竞争窗口  $W_0$  的关系

相反, 由图 13 可以看出, 增加  $W_1$  导致  $AC_1$  的吞吐量减少 90%, 同时  $AC_0$ 、 $AC_2$  和  $AC_3$  的吞吐量分别增加了 13.8%、6.8% 和 3.7%。在图 14 和图 15 中也观察到类似趋势, 增加  $W_2$  和  $W_3$  使  $AC_2$  和  $AC_3$  的吞吐量分别减少了 83.1% 和 42%, 但由于竞争压力减小, 其他 AC (特别是优先级较低的) 从中受益。

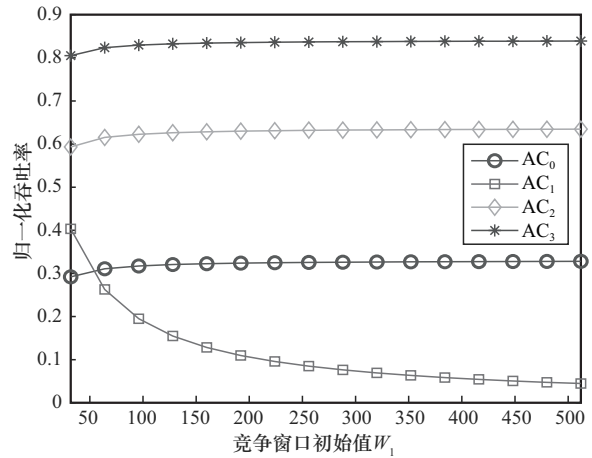


图 13 非饱和条件下  $AC_1$  的吞吐量与初始竞争窗口  $W_1$  的关系

这些结果揭示了一个根本性的权衡: 增加高优先级 AC 的竞争窗口会抑制其信道接入能力, 但能减轻其他 AC 的竞争。另一方面, 增加低优先级 AC 的竞争窗口会导致所有 AC 的吞吐量普遍下降, 因为这会带来更长的空闲期、更长的退避时延和更长的排队时间, 从而降低了整体网络效率。

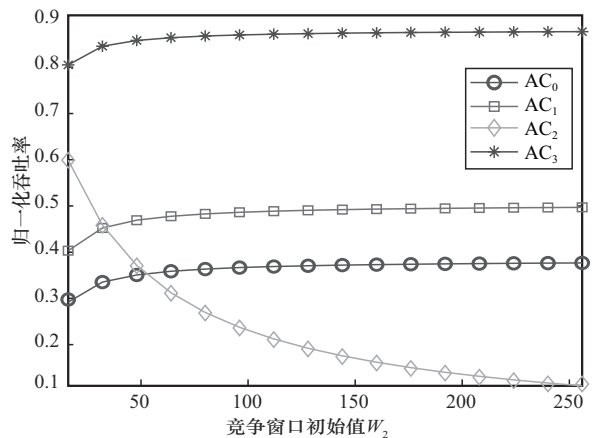


图 14 非饱和条件下  $AC_2$  的吞吐量与初始竞争窗口  $W_2$  的关系

从网络优化的角度来看, 减小高优先级 AC (例如, 用于 AR/VR 等时延敏感流量的  $AC_3$ ) 的初始竞争窗口可以有效提高其吞吐量。然而, 这通常以牺牲低优先级服务为代价。

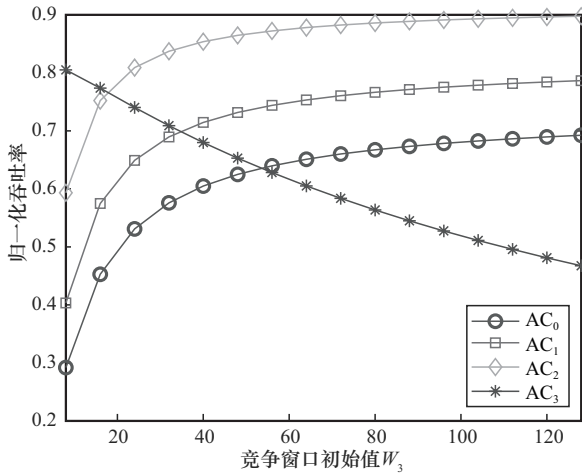


图 15 非饱和条件下 AC<sub>3</sub> 的吞吐量与初始竞争窗口 W<sub>3</sub> 的关系

平均队列长度与数据速率的关系如图 16 所示。由图 16 可以看出，随着数据包到达速率的增加，由于更高的排队需求，队列长度相应增长。对于 AC<sub>0</sub> 和 AC<sub>1</sub>，队列在约 0.3 Mbit/s 时迅速达到缓冲区容量，而对于 AC<sub>2</sub> 和 AC<sub>3</sub>，此阈值出现在 0.8 Mbit/s 附近。这些拐点标志着到达速率超过服务速率的转折点，导致积压累积和缓冲区满状态。一旦达到饱和，额外的数据包必须等待队列空间可用，从而增加了排队压力。

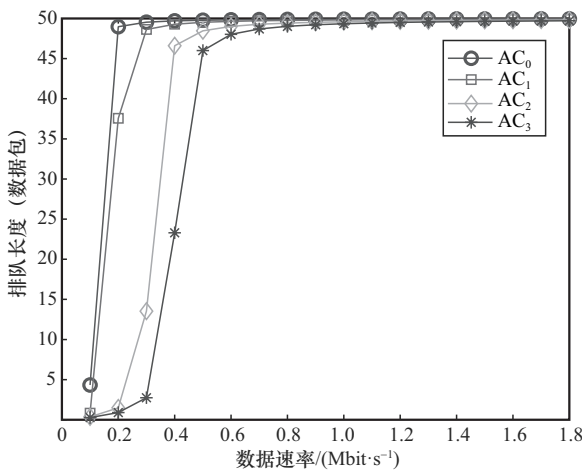


图 16 平均队列长度与数据速率的关系

平均排队时延与数据速率的关系如图 17 所示。由图 17 可以看出，对于高优先级的 AC<sub>3</sub> 和 AC<sub>2</sub>，排队时延分别在约 0.5 Mbit/s 和 0.4 Mbit/s 时稳定下来，表明它们较高的优先级确保了相对及时的信道接入。相比之下，低优先级 AC<sub>0</sub> 和 AC<sub>1</sub> 的排队时延在超过这些速率后继续增长，尽管一旦网络接近饱

和，增长率会逐渐减慢。在满载条件下，AC<sub>3</sub> 的排队时延约为 AC<sub>0</sub> 的 20% 和 AC<sub>1</sub> 的 37%。

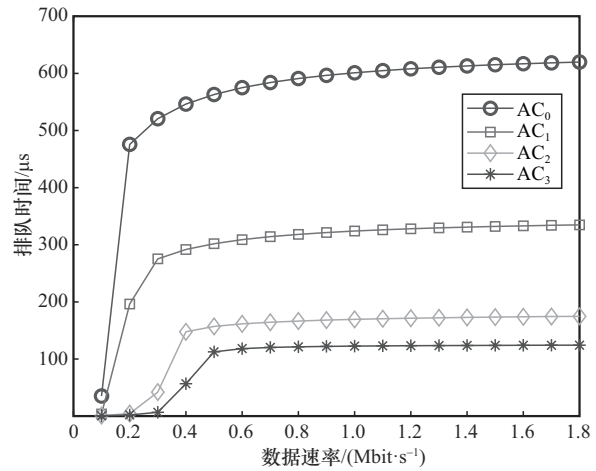


图 17 平均排队时延与数据速率的关系

这些结果凸显了 EDCA 机制固有的公平性不对称：高优先级 AC 受益于优先的信道接入，从而获得更短的队列和时延，而低优先级 AC 则面临更激烈的竞争、更高的排队开销和更长的服务时延。

### 4 结束语

本文提出了一个针对非饱和和流量条件下的多链路 EDCA 网络的综合性能模型，该模型融合了捕获效应和关键的 EDCA 参数。仿真结果验证了所提模型能有效地区分 4 个 AC 的 QoS 水平。具体而言，当重传限制次数设置为 10 时，AC<sub>0</sub>、AC<sub>1</sub> 和 AC<sub>2</sub> 的吞吐量达到各自的最大值。此外，调整最高优先级 AC<sub>3</sub> 的初始竞争窗口 W<sub>3</sub> 会导致其吞吐量下降 42%，但同时分别将 AC<sub>0</sub>、AC<sub>1</sub> 和 AC<sub>2</sub> 的吞吐量提高了 138%、97.5% 和 52.5%。

通过分析建模和仿真，本文系统地分析了关键性能指标之间的相互作用，包括吞吐量、丢包率、数据速率、部署密度、接入点覆盖半径、捕获阈值以及 EDCA 参数设置。结果表明，增加干扰非 AP MLD 的部署密度、扩大 AP-MLD 的覆盖半径或提高捕获阈值会显著削弱捕获效应。这会导致捕获概率降低、外部碰撞概率升高，并最终造成所有 AC 的吞吐量下降。

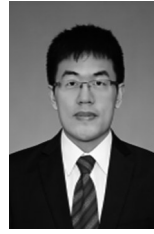
为了在实践中充分利用捕获效应，多链路竞争点的部署密度应保持在每平方米 0.25 个设备以下，且捕获阈值应保持在 35 dB 以下。

## 参考文献:

- [1] ABHIJIT S, GANGADHAR D, MOHAN J, et al. AR CARD: interactive cards using augmented reality[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [2] TYCHKOV A Y, GRACHEV A V, ALIMURADOV A K. Virtual reality in information transfer[C]//Proceedings of the 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Piscataway: IEEE Press, 2020: 826-830.
- [3] PATIL S, PATIL S, PINGALE R, et al. Smart framework of electricity billing system for conservation of energy.: (using IOT and automation)[C]//Proceedings of the 2019 5th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [4] GARCIA-RODRIGUEZ A, LOPEZ-PEREZ D, GALATI-GIORDANO L, et al. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(4): 102-108.
- [5] KHOROV E, LEVITSKY I, AKYILDIZ I F. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88664-88688.
- [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] XIAO Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(4): 1506-1515.
- [8] TANTRA J W, FOH C H, MNAOUE A B. Throughput and delay analysis of the IEEE 802.11e EDCA saturation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2005. ICC 2005.2005. Piscataway: IEEE Press, 2005: 3450-3454.
- [9] HUANG Z Z, ZHONG Y, GE X H. 4-D Markov chain analysis of multi-link EDCA in next-generation Wi-Fi[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(1): 228-232.
- [10] PRAKASH G, THANGARAJ P. Throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA under non saturation condition[C]//Proceedings of the 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 117-121.
- [11] HUANG C, SHIODA S. Detailed analysis for IEEE 802.11e EDCA in non-saturated conditions-Frame-transmission-cycle approach[C]//Proceedings of the 11th International Symposium and Workshops on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt). Piscataway: IEEE Press, 2013: 601-608.
- [12] HUANG C Y, SHIODA S. Analytical model for IEEE 802.11e EDCA with non-saturated stations[C]//Proceedings of the 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 437-442.
- [13] NARIBOLE S, KANDALA S, RANGANATH A. Multi-channel mobile access point in next-generation IEEE 802.11be WLANs[C]//Proceedings of the ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [14] NARIBOLE S, LEE W B, KANDALA S, et al. Simultaneous transmit-receive multi-channel operation in next generation WLANs[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [15] KOROLEV N, LEVITSKY I, KHOROV E. Analytical model of multi-link operation in saturated heterogeneous Wi-Fi 7 networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(12): 2546-2549.
- [16] ZHANG J, GAO Y Y, SUN X H, et al. Synchronous multi-link access in IEEE 802.11be: modeling and network sum rate optimization[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2309-2314.
- [17] SONG T, KIM T. Performance analysis of synchronous multi-radio multi-link MAC protocols in IEEE 802.11be extremely high throughput WLANs[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 317.
- [18] LÓPEZ-RAVENTÓS Á, BELLALTA B. IEEE 802.11be multi-link operation: when the best could be to use only a single interface[C]//Proceedings of the 2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [19] LÓPEZ-RAVENTÓS Á, BELLALTA B. Multi-link operation in IEEE 802.11be WLANs[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(4): 94-100.
- [20] LÓPEZ-RAVENTÓS Á, BELLALTA B. Dynamic traffic allocation in IEEE 802.11be multi-link WLANs[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(7): 1404-1408.
- [21] KULSHRESTHA J, AKHTAR N, HATHI P, et al. LFTA: legacy friendly traffic allocation strategy for multi-link operation in WiFi7[C]//Proceedings of the 2024 16th International Conference on Communication Systems & NETWORKS (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 448-456.
- [22] HADZI-VELKOV Z, SPASENOVSKI B. Capture effect in IEEE 802.11 basic service area under influence of Rayleigh fading and near/far effect[C]//Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2002: 172-176.
- [23] UDDIN M F. Capture effect on downlink throughput of a CSMA based WLAN[C]//Proceedings of the 2017 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [24] ALI KARABULUT M, SHAHEN SHAH A F M, ILHAN H. Performance of the CR-MAC with channel fading and capture effect under practical traffic scenarios for VANETs[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). Piscataway: IEEE Press, 2019: 0647-0652.
- [25] SHAH A F M S, ILHAN H, TURELI U. Modeling and performance analysis of the IEEE 802.11 MAC for VANETs under channel fading and capture effect[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.

- [26] HAENGGI M. Stochastic Geometry for Wireless Networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [27] ZHONG Y, CHEN Z L, ZHANG W Y, et al. Dual-zone hard-core model for RTS/CTS handshake analysis in WLANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(11): 9323-9337.
- [28] BACCELLI F, BŁLASZCZYŹYŹYŹ B. Stochastic geometry and wireless networks: volume II applications[J]. Foundations and Trends® in Networking, 2009, 4(1/2): 1-312.
- [29] ZHONG Y, MAO G Q, GE X H, et al. Spatio-temporal modeling for massive and sporadic access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(3): 638-651.
- [30] ZHONG Y, CHEN Z L, HAN T, et al. Spatio-temporal interference correlation: influence of deployment patterns and traffic dynamics[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 73(5): 3199-3213.
- [31] IEEE P802.11be/D3.0. IEEE 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 amendment: enhancements for extremely high throughput (EHT)[S]. 2023.
- [32] LEVITSKY I, OKATEV Y, KHOROV E. Study on simultaneous transmission and reception on multiple links in IEEE 802.11be networks[C]// Proceedings of the 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [33] ZHANG L, YIN H, ROY S, et al. IEEE 802.11be network throughput optimization with multilink operation and AP controller[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(13): 23850-23861.
- [34] KOROLEV N, LEVITSKY I, KHOROV E. Analyses of NSTR multi-link operation in the presence of legacy devices in an IEEE 802.11 be network[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 94-98.

## [作者简介]



钟祎 (1989-), 男, 湖北仙桃人, 华中科技大学副教授, 主要研究方向为无线网络建模、时空网络分析、绿色低碳网络、下一代 Wi-Fi。



毕王霖峰 (2003-), 男, 湖北荆州人, 华中科技大学硕士生, 主要研究方向为下一代 Wi-Fi。



葛晓虎 (1972-), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息热力学通信、双碳网络、元宇宙和区块链、AI 和通信的融合等。



黄逸 (1989-), 男, 安徽合肥人, 同济大学助理教授, 主要研究方向为集成感知与通信、无人机通信、绿色无线通信及大规模多输入多输出技术。