

FTTR C-WAN 架构下多 AP 协同的 Co-EDCA 机制研究

吴伟民, 曾宸

(华中科技大学电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对光纤到房间 (FTTR) C-WAN2.0 架构中密集部署多接入点引发的空口竞争冲突加剧、传输时延不可控等问题, 提出了一种多 AP 协同的增强型分布式信道接入 (Co-EDCA) 机制。通过冲突图建模与时隙分配实现干扰域隔离, 并利用强化学习动态调整竞争窗口, 优化多 SFU 的竞争行为。仿真结果表明, 该机制在 SFU 密集场景下可降低 23% 的冲突概率, 提升 98% 的系统吞吐量, 并减少 57% 的传输时延, 有效解决了 C-WAN2.0 架构下的资源竞争与服务质量保障问题。

关键词: FTTR; C-WAN 架构; 多 AP 协同; 冲突图; 强化学习

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025241

Study on Co-EDCA mechanism for multi-AP collaboration in FTTR C-WAN architecture

WU Weimin, ZENG Chen

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

Abstract: Aiming at the problems of intensified air port competition conflicts and uncontrollable transmission delay caused by the dense deployment of multiple access points in the fiber-to-the-room (FTTR) C-WAN2.0 architecture, a collaboration-enhanced distributed channel access (Co-EDCA) mechanism with multi-AP was proposed. The interference domain isolation was achieved through conflict graph modeling and time slot allocation, and the competition window was dynamically adjusted using reinforcement learning to optimize the competitive behavior of multiple SFUs. Simulation results show that the proposed mechanism can reduce the conflict probability by 23%, improve the system throughput by 98%, and reduce the transmission delay by 57% in SFU-dense scenarios, effectively solving the resource competition and quality of service guarantee problems under the C-WAN2.0 architecture.

Keywords: FTTR, C-WAN architecture, multi-AP collaboration, conflict graph, reinforcement learning

0 引言

随着家庭组网需求的持续增长, 工业和信息化部在关于开展“信号升格”的专项行动中提出持续推进居住小区、城中村、城乡接合部等移动网络信号覆盖和基于光纤到房间 (FTTR, fiber to the room) 的室内 Wi-Fi 覆盖。FTTR 即光纤部署到房间的设计方案^[1], 是一种基于光纤通信的新的家庭网络拓扑, 使每个房间都可以达到千兆以上的网速, 通过光纤从室内信息箱内延伸到住房内每个信息点, 在

室内信息箱内设置主网关或主网关和光分路器, 在各个房间内设置边缘 ONT (optical network terminal) 设备, ONT 下游的接入点 (AP) 为家庭中的各个网络终端提供网络通信服务^[2]。

随着 FTTR 技术与产业的蓬勃发展, 面向第六代固定通信网 (F6G, the 6th generation fixed network) 的集中式无线光接入网络 (C-WAN, centralized wireless optical access network) 架构逐步演进至 2.0 阶段。C-WAN 2.0 架构通过控制面与数据面双

上移、池化基带与分布式射频拉远等技术，实现了光与 Wi-Fi 资源的深度协同，支持零漫游与多 AP 并发能力，具有成本低、时延小、集中管控与分布接入、光纤多点拉远、远端部署极简等优点^[3]。

然而，密集部署的 AP 间物理层干扰加剧^[4]、MAC 层无序竞争导致的空口冲突与资源浪费等问题严重制约了 C-WAN 2.0 的性能优势。现有技术方案在动态干扰环境下面临性能与复杂度的挑战^[5]，MAC 层竞争冲突管理缺乏跨设备协同机制。如何通过协同设计实现干扰抑制与资源优化，成为 C-WAN 2.0 架构规模化部署的关键瓶颈。

针对上述挑战，本文提出一种多接入点协同的增强型分布式信道接入（Co-EDCA, coordinated-enhanced distributed channel access）机制，结合冲突图建模与时隙分配实现干扰域隔离，并通过强化学习动态调整竞争窗口，高效协调多 SFU 的竞争行为、降低冲突概率并保障服务质量。通过系统性优化空口资源的协同能力，本文不仅为家庭网络体验升级提供技术保障，更为下一代固定网络与移动网络的深度融合奠定基础^[6]，具有显著的学术价值与产业应用前景。

1 C-WAN 架构介绍和问题分析

1.1 C-WAN 2.0 新架构

FTTR C-WAN 架构如图 1 所示。中心化控制器位于主设备 MFU（main fiber unit）内，通过光纤连接各从设备 SFU（sub fiber unit）并实时搜集全

屋网络状态信息，生成合理的调度策略，对光和 Wi-Fi 传输进行中心化控制，实现光链路和无线链路的资源协同配置。

随着 C-WAN 架构的进一步发展，C-WAN 架构也正从 1.0 向 2.0 迭代。C-WAN 1.0 利用光物理（oPHY, optical physical）层低时延管控通道，将所有 SFU 控制面上移至 MFU，实现全局 Wi-Fi 在数据路由、发送频率与信道、发送功率、收发时间片、收发波束等静态与准静态配置控制参数的集中化管控与协同^[7]。

FTTR C-WAN 2.0 架构如图 2 所示。C-WAN 2.0 架构在 1.0 架构控制面上移基础上，进一步将数据面上移，将 SFU 的 Wi-Fi 协议与信号处理更多地移至上移至 MFU，C-WAN 协同层次也将从 L2 层下移到 L1 层，对于 Wi-Fi 漫游多 AP 协同将进一步在 PPDU 级形成联合收发，支撑零漫游和多点位零干扰并发能力，同时，在光加 Wi-Fi 的协同上形成更强的跨层跨域协同，支持更好的联合传输和调度能力。由于光和 Wi-Fi 处理更加集中化，也会使从设备更加容易部署，方便部署网内 Wi-Fi 协议引进，甚至包括部署星闪、BlueTooth、UWB 等其他短距通信技术，并进一步做好彼此之间的协作。

C-WAN 2.0 架构作为一种正在研究与高速发展中的家庭组网架构，其已经应用的关键技术包括池化基带技术和点对多点（P2MP, point to multipoint）网络架构。其中，池化基带技术通过将多个基带处理单元（BBU）集中放置，形成一个“基带池”，

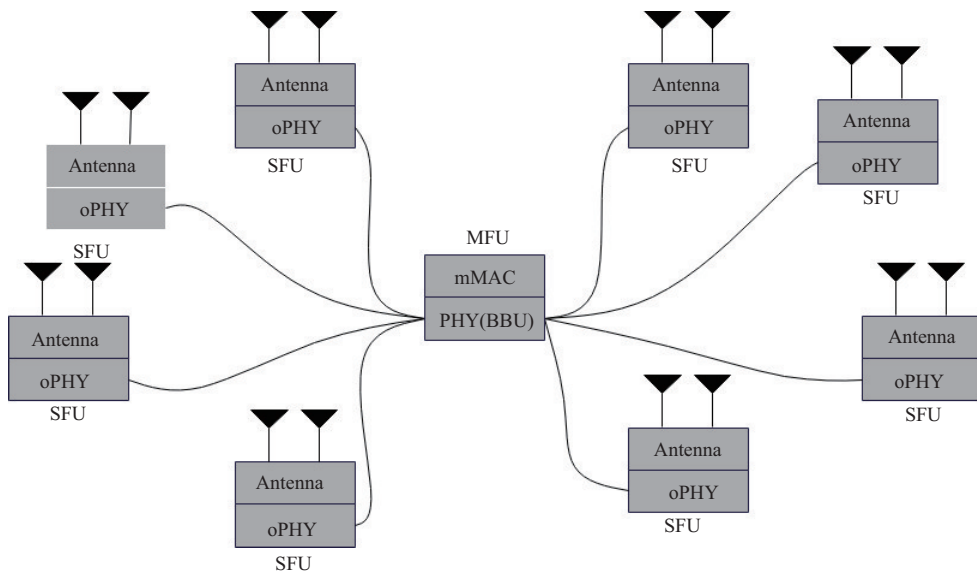


图 1 FTTR C-WAN 1.0 架构

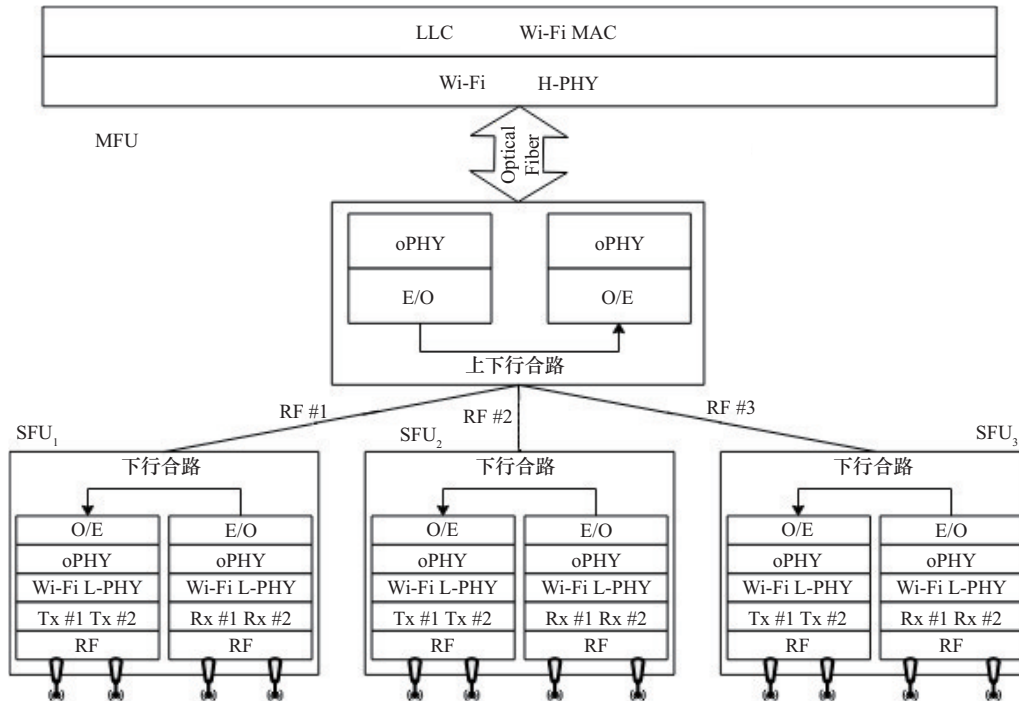


图2 FTTR C-WAN 2.0架构

从而实现对基带资源的统一管理和动态分配^[8]。在池化基带架构中，基带处理单元集中放置在主控制器即MFU中，而射频拉远单元（RRU）则分散安装在各个覆盖点。通过光纤连接BBU和RRU，实现射频信号的传输和处理。BBU可以根据不同区域的话务量动态分配基带资源，从而优化资源利用。P2MP网络架构则允许一个单一的发送方向多个接收方同时发送数据。这种架构与传统的点对点架构不同，后者仅支持2个终端之间的连接。在P2MP架构中，数据从一个中心站点发送到多个接收器，而不需要为每个接收器单独发送数据流^[9]。这使P2MP特别适用于需要向多个用户或设备分发相同内容的场景，例如电视广播、无线网络和某些类型的电信服务。

1.2 竞争冲突问题分析

在C-WAN 2.0架构下，由于池化基带技术以及点对多点网络架构的引进，系统的竞争冲突来源相比于传统FTTR架构更加复杂。

池化基带技术在降低系统建设维护成本的同时带来多SFU之间基带资源的调度分配问题，外加MFU与SFU之间通过用P2MP网络架构连接所带来上行信息同步时延，还有多AP协同技术在C-WAN 2.0架构中的实现等额外考量因素。三者叠加造成了在C-WAN 2.0架构下的信道接入如果仅仅采

用传统架构独立的EDCA机制，可能会大幅增加系统竞争冲突率，浪费系统资源，降低整体吞吐量，最终导致用户体验下降。如何设计一套有效的多AP协同的EDCA机制是当前C-WAN2.0架构下亟待解决的问题。下面详细分析C-WAN架构下的竞争冲突来源。

类别1 由于池化基带资源不足，竞争到空口的硬件队列当时无可分配到的基带资源，不能及时发送数据，造成竞争冲突。

类别2 由于MFU与SFU之间使用P2MP连接的特性，光物理层上行存在时延，即MFU与SFU之间的信道状态信息同步存在时延，空口情况可能会在该时延内变化，造成信道竞争冲突。

类别3 如图3所示，由于密集部署的SFU之间存在竞争关系，同一干扰域内的多个SFU并发造成信道竞争冲突。

类别4 STA与MFU中EDCA队列同时竞争到空口，产生信道竞争冲突。

类别1和类别2可归结为C-WAN 2.0架构本身所带来的问题；类别3可归结为多SFU间缺乏协调机制，无序竞争导致的冲突资源浪费；类别4是所有使用EDCA机制进行无线信道竞争接入的系统都会存在的问题。本文聚焦类别3的问题，提出多SFU间的高效协调机制，降低冲突概率并保障服务质量。

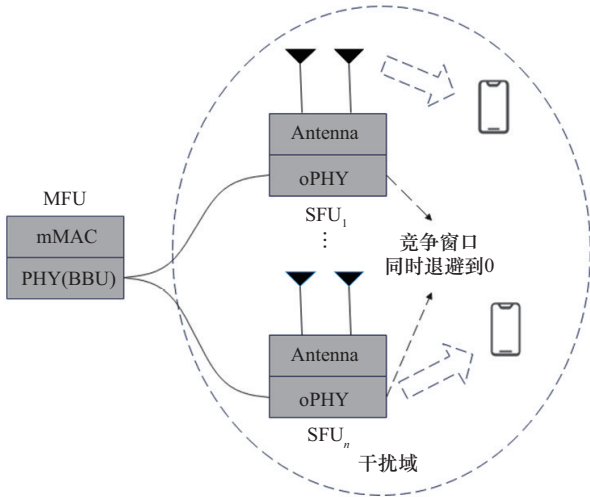


图3 多SFU并发导致的竞争冲突

2 多AP协同的Co-EDCA机制设计方案

针对C-WAN 2.0架构下密集部署的SFU间因缺乏协调，退避窗口同步归零时产生高概率冲突问题，本节提出一种多AP协同下的Co-EDCA机制，通过冲突图建模与时隙分配实现宏观干扰隔离，结合Q学习（Q-learning）驱动的动态竞争窗口（CW, contention window）调整，显著降低冲突率，提升系统吞吐量，并支持动态网络环境下的资源优化调度，兼具图论与强化学习的理论严谨性及工程部署的可行性。

2.1 冲突图模型构建

定义顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ，每个顶点 v_i 代表一个SFU；边集合 E ，若2个SFU v_i 和 v_j 处于同一干扰域（即信号覆盖范围重叠），则存在边 $e_{ij} \in E$ 。冲突图模型示意如图4所示，可构建冲突图 $G = (V, E)$ 。干扰关系可以通过设定RSSI或SINR的阈值来判定， $e_{ij} \in E \Leftrightarrow \text{SINR}_{ij} < \gamma_{th}$ ，其中 γ_{th} 为干扰判定门限。

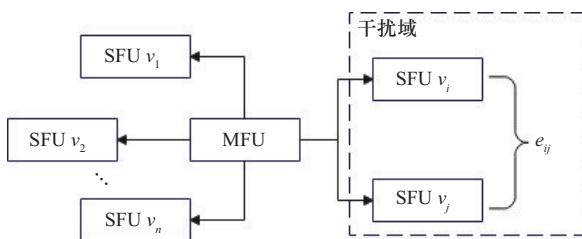


图4 冲突图模型示意

冲突图 $G = (V, E)$ 中，顶点 v_i 的度数 $d(v_i)$ 表示与其相连的边数（即干扰的SFU数量）。最大顶

点度 $\Delta(G) = \max \{d(v_i)\}$ 表示图中干扰最密集的SFU的干扰邻居数量。为每个SFU分配唯一的时隙（颜色），确保相邻顶点颜色不同，最小化时隙数 $\chi(G)$ 由 $\Delta(G)$ 直接决定 $\chi(G) \geq \Delta(G) + 1$ 。

2.2 时隙分配策略

基于贪心原则对SFU进行时隙分配，输入按度数降序排列的顶点列表 $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ，输出时隙分配方案 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ 。具体步骤如算法1所示。

算法1 SFU进行时隙分配

- 1) 初始化颜色集合 $C = \{1, 2, \dots, \chi(G)\}$;
- 2) 遍历顶点，为 v_i 分配未被其邻居占用的最小颜色 c_i ;
- 3) 若颜色不足，扩展 C 至 $\chi(G) + 1$ 。

这样的分配原则会优先为冲突最多的SFU分配最稀缺的时隙。

图着色法通过为每个SFU分配不同的“颜色”（即时隙），确保相邻顶点（干扰设备）颜色不同，从而在时间上隔离它们的发送行为，而非干扰设备则可共享同一时隙，提高频谱利用率。例如，距离较远的2个SFU可以在同一时隙发送，互不影响。该方式在宏观时间上做到了同一干扰域内的SFU分配到不同时隙，理论上消除其并发冲突，但在微观上仍有其局限性，具体如下。

- 1) 动态网络环境：SFU位置变化可能导致新的干扰关系，原有时隙分配失效。
- 2) 非完美干扰检测：SINR/RSSI的波动可能导致干扰关系误判。
- 3) 外部干扰源：其他无线设备（如蓝牙、微波炉）可能在同一频段产生突发干扰。

为此本文在时隙分配基础上引入基于Q学习的动态竞争窗口调整，进一步优化冲突率与服务质量，以提升在动态网络中的表现。

2.3 动态竞争窗口调整

传统竞争窗口的调整规则相对简单，未考虑实时流量负载、信道质量或历史冲突数据，导致资源分配不够精细。为了充分利用空口资源，本文基于多维参数驱动的Q学习优化竞争窗口的调整规则。

Q学习是一种基于值迭代的强化学习算法，其框架如图5所示。其核心思想是通过智能体（agent）与环境的交互，学习一个最优策略，使长期累积奖励最大化。Q学习的关键在于构建一个Q表（QTable），记录在特定状态下采取某一动作的预期收益^[10]。



图5 Q学习框架

在 Co-EDCA 机制中，Q 学习的目标是通过动态调整 SFU 的竞争窗口，最小化冲突率并最大化系统吞吐量。基于 Q 学习的竞争窗口调整方法如算法 2 所示。

算法 2 基于 Q 学习的竞争窗口调整方法

- 1) 状态空间， $s_i = (\lambda_i, \text{SINR}_i, P_{\text{collision},i})$ ，其中 λ_i 为流量负载， SINR_i 反映信道质量， $P_{\text{collision},i}$ 为历史冲突率；
- 2) 动作空间，调整 CW 的离散动作， $\text{CW}_i \leftarrow \pm 10\% \text{CW}_{\text{base}}$
- 3) 奖励函数，引导智能体优化冲突率、吞吐量和时延，设计多目标加权和为

$$r_i = \alpha(1 - P_{\text{collision},i}) + \beta \log(1 + \text{SINR}_i) - \gamma \lambda_i \quad (1)$$

其中，冲突率项 $\alpha(1 - P_{\text{collision},i})$ 冲突率越低，奖励越高 ($\alpha = 0.6$)；信道质量项 $\beta \log(1 + \text{SINR}_i)$ 在高 SINR 时提升传输可靠性 ($\beta = 0.3$)；负载惩罚项 $\gamma \lambda_i$ 用来抑制高负载设备的过度竞争 ($\gamma = 0.1$)；

- 4) Q 值更新规则，采用贪婪策略，以 10% 概率随机探索新动作，90% 概率选择当前最优动作，表示为

$$Q(s_i, a_i) \leftarrow Q(s_i, a_i) + \zeta [r_i + \delta \max_{a'} Q(s_i, a') - Q(s_i, a_i)] \quad (2)$$

其中，学习率 $\zeta = 0.1$ ，折扣因子 $\delta = 0.9$ 。

Q 学习在 Co-EDCA 机制中的实际工作流程如下。

步骤 1 训练阶段

- 1) 数据收集：MFU 周期性获取各 SFU 的数据。
- 2) 状态编码：将连续参数离散化以降低计算复杂度。
- 3) 动作选择：根据 ϵ -贪婪策略选择调整动作。
- 4) 奖励计算：根据冲突率、SINR 和负载计算即时奖励。
- 5) 按贝尔曼方程更新 Q 表，收敛后得到最优策略。

步骤 2 执行阶段

- 1) 动态 CW 调整：MFU 根据 Q 表为每个 SFU

选择最优 CW 调整动作。

- 2) 冲突监控：实时统计冲突率，若超过阈值（如 15%），触发 Q 表重新训练。

2.4 冲突率优化推导证明

在传统 EDCA 机制中，所有设备的竞争窗口为固定值，设网络中共有 N 个设备竞争信道，每个设备独立生成退避计数器 $b_i \in [0, \text{CW}_{\text{base}}]$ ，均匀随机选择。2 个或多个设备在同一时隙退避计数器归零发生冲突的概率为^[11]

$$P_{\text{传统}} = 1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{1}{\text{CW}_{\text{base}}}\right) \approx \frac{N}{\text{CW}_{\text{base}}} \quad (3)$$

其中，单设备发送概率为 $p = \frac{1}{\text{CW}_{\text{base}}}$ ，无冲突概率为所有设备不发送的概率，为 $\prod_{i=1}^N (1 - p) \approx e^{-Np}$ （泊松近似），当 $Np \ll 1$ 时，冲突概率近似为 $1 - e^{-Np} \approx \frac{N}{\text{CW}_{\text{base}}}$ 。

通过冲突图着色分配时隙，将设备分为 $\chi(G)$ 组，每组最多 $\frac{N}{\chi(G)}$ 个设备。每组冲突率近似为

$$P_{\text{组}} \approx \frac{N}{\text{CW}_{\text{base}}} \chi(G) \quad (4)$$

在动态竞争窗口 CW 机制中，每个设备的 CW 值根据实时状态动态调整。设备 i 的 CW 值为 CW_i ，其发送概率为 $p_i = \frac{1}{\text{CW}_i}$ ，可知冲突率为

$$P_{\text{动态}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i) \approx \sum_{i=1}^N p_i - \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} p_i p_j \quad (5)$$

Q 学习通过调整 CW_i ，使同一时隙内设备的发送概率满足 $\sum_{i=1}^{\chi(G)} p_i \leq \sqrt{\frac{\log N}{N}}$ ，代入冲突率式可知完整 Co-EDCA 机制的冲突率上界为

$$P_{\text{协同}} \leq \frac{\Delta(G)}{\chi(G)} \sqrt{\frac{\log N}{N}} P_{\text{传统}} \quad (6)$$

因 $\chi(G) \geq \Delta(G) + 1$ 且 $\sqrt{\frac{\log N}{N}} < 1$ ，冲突率相较于传统 EDCA 机制大幅降低。

3 仿真分析

本节通过 C++ 语言搭建 C-WAN 2.0 MAC 层仿

真平台，进行多 AP 协同下的 Co-EDCA 机制的仿真。以此来验证在 C-WAN 2.0 架构下有无 Co-EDCA 机制对系统内站点间的碰撞概率、传输时延以及整网吞吐量的影响。该仿真平台采用分层设计思想，对物理层进行参数化抽象，仅通过信道传输速率、信噪比参数以及误帧率等关键指标表征物理层特性，而不需要实现具体的编解码过程。MAC 层仿真模块实现了协议规定的基本控制流程与数据处理机制，确保能够准确评估 MAC 协议的核心性能表现。

仿真平台如图 6 所示，分别设置 MFU 类 (MFU-device)、SFU 类 (SFU-device) 与 STA 类 (Basic-device)，单个 MFU 通过 oPHY 光纤通道连

接多个 SFU，而每个 SFU 分别连接多个 STA。以上所有设备分别对应各自独立运行的线程，由 SysClock 产生的时钟进行同步。时钟对象 SysClock 存储当前仿真时间和线程完成的数量，每个时钟周期内，所有的设备线程完成一轮操作后，时钟对象会将仿真时间推进一个时钟周期。

仿真代码按照时钟对象周期进行收发处理，每个周期依次执行以下步骤：1)空口检测，2)流量生成，3)数据队列管理，4)数据调度，5)报文发送处理，6)信号发送处理，7) oPHY 上下行，8)信号接收处理，9)报文接收处理，10)EDCA 处理。

仿真采用的参数如表 1 所示。

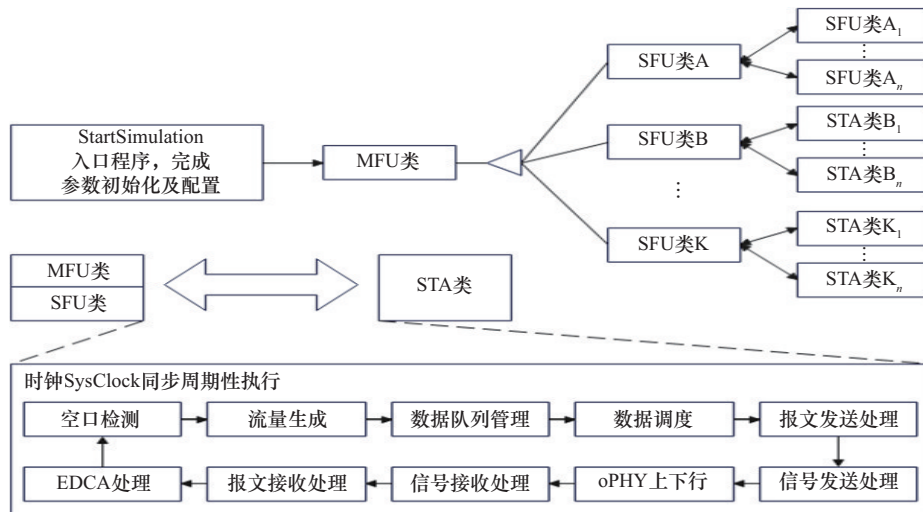


图6 仿真平台

表 1 仿真参数

参数	值	说明
流量生成模型	周期性模型/泊松模型	周期内轮流选取模型生成流量
报文大小 (pktSize)	100 μs ~ 2 ms	随机生成，服从均匀分布
业务类型与优先级	语音视频 (AC_VO) : 75% 尽力而为 (AC_BE) : 15% 背景 (AC_BK) : 10%	TID 队列映射到 EDCA 优先级 (0~7)
EDCA 竞争窗口	默认值 (AC_VO: [3,7])	高优先级业务使用较小 CW 以降低时延
随机回退值控制时延	128 μs	仅对发送时长大于或等于 128 μs 的报文生效
AIFSN 值	AC_VO: 2, AC_BE: 3, AC_BK: 7	仲裁帧间间隔数，区分优先级
回退调整策略	AIFSN+回退值排序后冲突修正	若多个设备回退值相同，后序设备回退值+1/+2，避免同时竞争
物理层传输速率	MCS11	决定单次数据传输的理论上限
误帧率	0.1	决定单次数据传输的成功概率
时钟周期	1 μs	系统最小时间单位，用于同步设备操作
仿真时长	1 000 000 时钟周期 (1s)	确保统计结果稳定

在仿真中，设置一个 MFU 携带 2~4 份基带能力，带动 2~8 个 SFU，每个 SFU 下连接着 2 个 STA。其中，每 2 个 SFU 处于同一冲突域，每个冲突域内共有 4 个 STA。在该场景下，同一冲突域中至多存在 6 个设备同步竞争空口。

仿真场景示意如图 7 所示，在该场景下，将无 RTS 机制无 EDCA 协同配置下的仿真结果作为性能基线，对比有 RTS 机制无协同、无 RTS 机制有协同以及有 RTS 机制有协同共 4 种情况下 1 000 000 时钟周期内的平均吞吐量与站点碰撞概率。

不同方案间系统平均吞吐量、站点碰撞概率与 SFU 数量的关系分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 的无 RTS 无协同机制的基线可知，在 SFU 数量较少时，整个 C-WAN 2.0 平台处于非繁忙状态，随着 SFU 与附带的 STA 数量的增加，系统吞吐量越来越大，站点碰撞概率只是略微变大。随着 SFU 与附带的 STA 数量继续增加，C-WAN2.0 平台进入繁忙状态，逐渐变为满负载运转，后续随着 SFU 数量的增大。

无 RTS 有协同下的 EDCA 机制，在部署 SFU 设备数量多且连接的 STA 设备多的场景下，可显著提高系统平均吞吐量并降低站点碰撞概率，相比于无 RTS 无协同机制的平均吞吐量提升 98%，站点碰撞概率下降 23%。

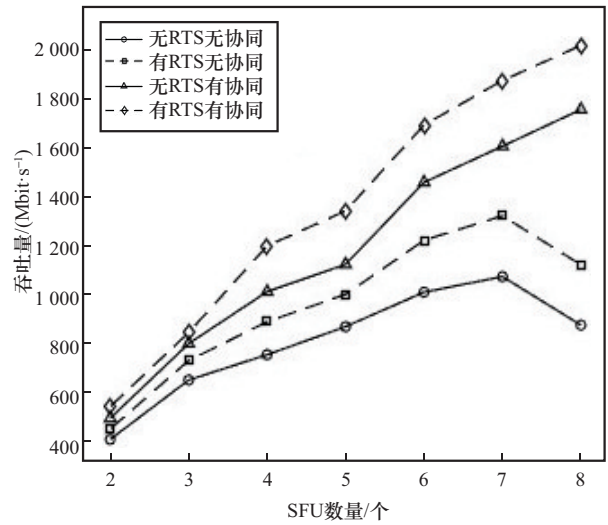


图 8 不同方案间系统平均吞吐量与 SFU 数量的关系

本文还在相同的仿真场景中进行了传输时延的仿真结果分析，图 10 表示部署 2~8 个 SFU 且每个 SFU 连接 2 个 STA 的不同情况下业务流量的前 90% 时延分布区间。可以看出，即便减少极端空口与基带资源需求条件下的大部分传输时延对比，在部署 SFU 设备数量多且连接的 STA 设备多的场景下，有协同机制的 C-WAN2.0 系统的传输时延相比于无协同的 C-WAN2.0 系统下降 57%。

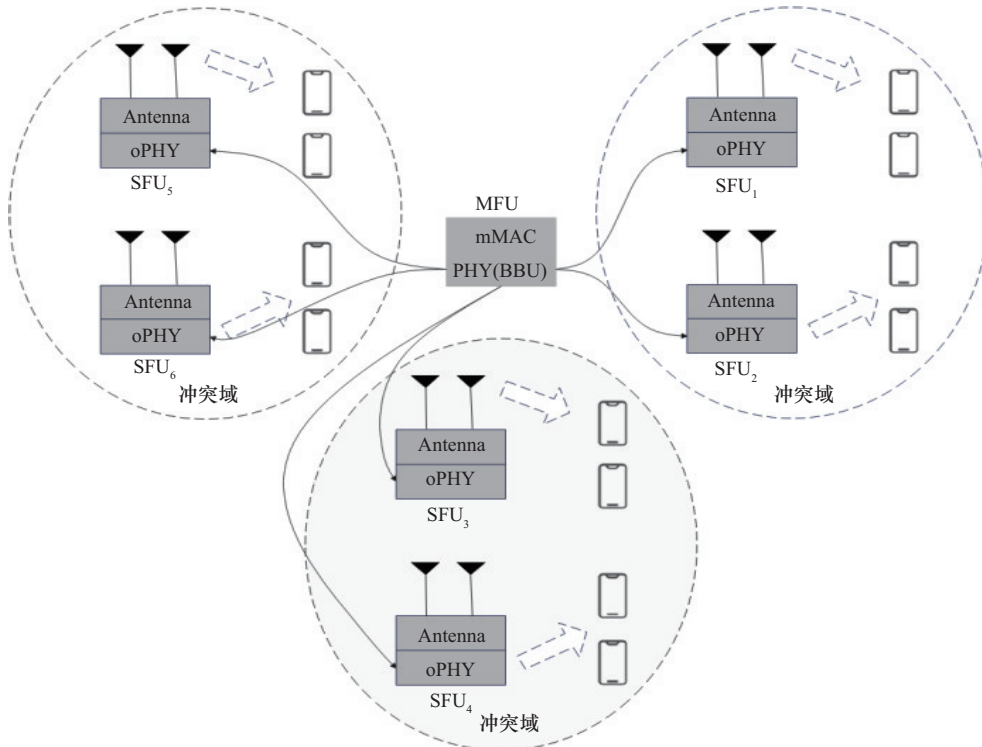


图 7 仿真场景示意

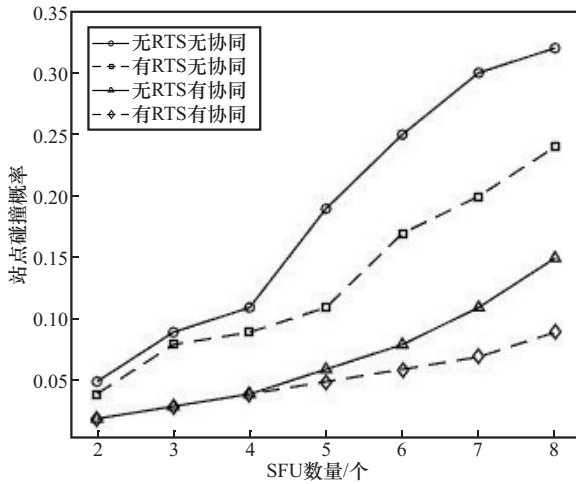


图9 不同方案间站点碰撞概率与SFU数量的关系

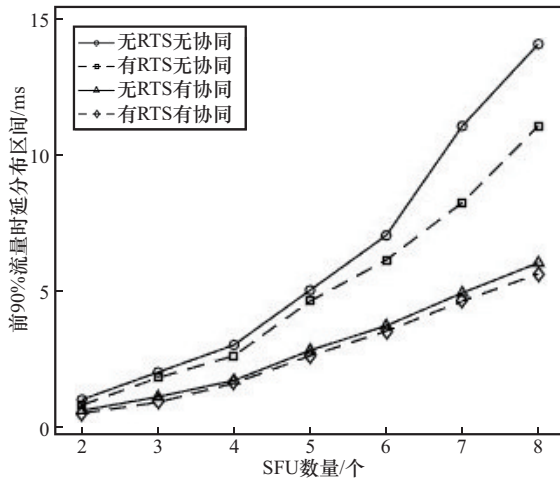


图10 业务流量的前90%时延分布区间

4 结束语

随着 FTTR 技术的演进，C-WAN2.0 架构通过池化基带技术与 P2MP 网络架构显著提升了资源利用效率与部署灵活性，但也引入了复杂的竞争冲突问题。如何高效协调多 SFU 的竞争行为、降低冲突概率并保障服务质量，成为实现系统高吞吐量与低时延的核心，本文通过冲突图建模与时隙分配实现宏观干扰隔离，并结合强化学习驱动的动态竞争窗口调整，构建具备环境感知能力的多 AP 协同框架，最终在降低冲突率的同时提升系统吞吐量与服务质量。

参考文献：

[1] WU X M, ZENG Y, SI X S, et al. Fiber-to-the-room (FTTR): standards and deployments[C]//Proceedings of the 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.

[2] HE C, LIU Y Q, HUANG Y D, et al. Q-band millimeter wave communication: enabling 10 Gbit/s home network in fiber-to-the-room scenario[C]// Proceedings of the 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.

[3] LIU X, LI J W, WU X M, et al. Fiber-to-the-room (FTTR) technologies for the 5th generation fixed network (F5G) and beyond[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Piscataway: IEEE Press, 2023: 351-354.

[4] ANDJAMBA T S, ZODI G L, JAT D S. Interference analysis of IEEE 802.11 wireless networks: a case study of Namibia University of Science and Technology[C]//Proceedings of the 2016 International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.

[5] ZHONG Z Z, KULKARNI P, CAO F M, et al. Issues and challenges in dense Wi-Fi networks[C]//Proceedings of the 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 947-951.

[6] LIU Y W, CLERCKX B, POPOVSKI P. Network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: an uplink rate-splitting multiple access approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(3): 2140-2152.

[7] 宽带发展联盟. FTTR 光纤到房间白皮书[R]. 2022. Broadband Development Alliance. White paper on FTTR: next-generation all-optical gigabit home networking[R]. 2022.

[8] ZENG X B, ZHU M, LI G X. Modelling and analysis of baseband unit pool for green C-RANs[C]//Proceedings of the 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.

[9] CHEN W, MULDER B D, VANDEWEGE J, et al. A novel technique for low-cost embedded non-intrusive fiber monitoring of P2MP optical access networks[C]//Proceedings of the OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-3.

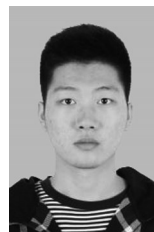
[10] CHOUDHARY R, GIANEY H K. Comprehensive review on supervised machine learning algorithms[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Machine Learning and Data Science (MLDS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 37-43.

[11] KONG Z N, TSANG D H K, BENSOU B, et al. Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(10): 2095-2106.

[作者简介]



吴伟民（1971-），男，湖北武汉人，博士，华中科技大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为互联网流媒体、宽带无线通信等。



曾宸（1999-），男，湖北天门人，华中科技大学博士生，主要研究方向为下一代 Wi-Fi 和物联网。