

# 基于 C-WAN 架构的多接入点下行协同传输与 MAC 层建模研究

曾宸, 徐鹏举, 刘奕晨, 刘应状

(华中科技大学电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为提升 FTTR 场景下多接入点协同的系统容量, 提出了一种基于集中式无线光接入网络 (C-WAN) 的下行协同传输方案。在中心控制器全局感知与统一调度下, 结合 EDCA 机制与协同空间复用 (C-SR), 实现 TDMA 时隙分配与精细化功率控制, 并将联合调度与功率分配以低复杂度方法近优求解。为评估方案性能, 构建了符合该协同机制的 MAC 层模型。仿真结果显示, 与 RTS/CTS 方案相比, 所提方案在不同终端分布和部署密度下均显著提升了吞吐量, 低干扰环境优势尤为突出; 在高密度条件下虽时延增加, 但容量优势依旧明显。

**关键词:** 集中式无线光接入; 协同空间复用; 图模型; 最大权重团; 马尔可夫链

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025230

## Downlink cooperative transmission and MAC layer modeling for multi-access point based on C-WAN architecture

ZENG Chen, XU Pengju, LIU Yichen, LIU Yingzhuang

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

**Abstract:** To enhance system capacity in FTTR scenarios with multi-AP coordination, a downlink cooperative transmission scheme based on a centralized wireless optical access network (C-WAN) was proposed. Under the global perception and unified scheduling of a central controller, the scheme integrated the EDCA mechanism with coordinated spatial reuse (C-SR) to achieve TDMA slot allocation and fine-grained power control. The joint scheduling and power allocation problem was solved near-optimally using a low-complexity method. To evaluate the scheme's performance, a MAC-layer model consistent with the cooperative mechanism was constructed. Simulation results show that, compared with the RTS/CTS scheme, the proposed method significantly improves throughput across different terminal distributions and deployment densities, with particularly notable advantages in low-interference environments. Although delays increase under high-density conditions, the capacity advantage remains evident.

**Keywords:** centralized wireless optical access, coordinated spatial reuse, graphical models, maximum weight clique, Markov chain

### 0 引言

随着无线局域网 (WLAN) 的持续演进, IEEE 802.11 系列标准不断提高网络容量和速率, 以满足高速上网和多媒体应用的需求<sup>[1]</sup>。进入

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) 时代后, 标准引入了正交频分多址 (OFDMA)、多用户多输入多输出 (MU-MIMO) 等先进技术。这些技术使单个接入点 (AP) 能提供极高吞吐量并同时支持更多用户,

收稿日期: 2025-08-04; 修回日期: 2025-10-10

通信作者: 刘应状, liuyz@hust.edu.cn

基金项目: 华为技术有限公司基金资助项目 (No.TP20250612004)

**Foundation Item:** Huawei Technologies Co., Ltd. Fund (No.TP20250612004)

Wi-Fi 网络正逐步迈向“高效率”时代<sup>[2]</sup>。与此同时,超高清视频、VR/AR 等新兴业务迅速发展,对家庭和公共场景的无线带宽、时延提出了极高要求<sup>[3-4]</sup>。为满足这种需求,光纤到房间 (FTTR) 技术应运而生。FTTR 通过将光纤延伸至室内每个房间,末端部署光纤接入的无线 AP,从而提供了千兆级别的家庭网络基础<sup>[5]</sup>。据统计,中国采用 FTTR 技术的用户已超过 1500 万,预计 2026 年将超过 8 000 万户<sup>[6]</sup>,FTTR 技术正在成为下一代家庭及办公网络的理想解决方案。

然而,仅仅依靠 FTTR 实现有线接入并不足以完全保障无线覆盖性能。在多房间、多楼层等复杂的住宅楼宇、校园和办公楼等高密度场景下,往往需要多个无线 AP 工作才能满足稳定的覆盖与容量需求。但目前多个 AP 的部署通常各自独立运行,采用载波侦听多址接入 (CSMA/CA) 机制随机争夺无线信道,导致严重的同频干扰和信道冲突,显著降低了网络性能。如何在多个 AP 间进行协调,已成为提升家庭和高密度 WLAN 性能的关键挑战之一<sup>[7]</sup>。为此,业界提出了一种新的 FTTR 架构:集中式无线光接入网络 (C-WAN) 架构<sup>[8]</sup>。具体而言,C-WAN 架构由一台主设备 (MFU) 和多个从设备 (SFU) 即房间 AP 组成,形成了“1 主多从”的集中控制架构。其中,MFU 通常部署在家庭或办公场所的主网关处,负责与核心网络通信、统一控制与资源调度;而多个 SFU 分散部署在房间或楼层末端,作为低功耗、高效的无线 AP,通过无源光网络 (PON) 技术与 MFU 构成可靠、低时延的光纤回传链路<sup>[9]</sup>,C-WAN 基本网络架构如图 1 所示。

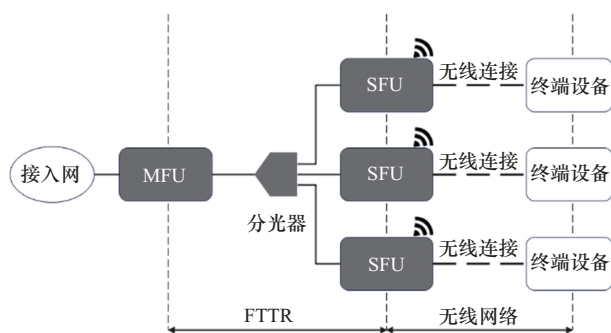


图 1 C-WAN 基本网络架构

在该架构下,多 AP 协同通信成为进一步提升网络效率与性能的关键技术。不同于传统分散的多

AP 机制,C-WAN 架构充分利用了 MFU 所具备的全局感知能力,通过主控设备对各个 SFU 实时状态信息(如信道状态、负载情况和用户 QoS 需求)的收集与分析,实现了多 AP 之间精确、高效的统一调度。在这一集中控制模式下,MFU 能够动态地对各个房间 AP 的频谱、时隙、功率等无线资源进行统一规划与协同调配,从而显著降低了无线链路间的相互干扰,提升了整体空间复用效率,实现更高的网络吞吐量和更低的传输时延。此外,这种集中控制机制在网络维护、故障检测与排除、用户设备无缝漫游管理等方面,相比传统 FTTR 架构都具有明显优势<sup>[10]</sup>。

尽管当前 802.11ax 标准通过 OFDMA、MU-MIMO 等技术有效提高了单个 AP 的接入能力,但在多 AP 协同通信的规范制定与技术实现方面仍显不足。本文结合下一代 Wi-Fi 标准演进方向与 C-WAN 集中控制优势,针对 FTTR 场景下的多 AP 协同通信技术进行了深入研究。本文的主要工作如下。

1) 在文献[11]将时分多址 (TDMA) 与协调空间复用 (C-SR) 技术相结合的基础上,提出了一种适用于 C-WAN 架构的集中式多 AP 协同传输与调度流程方案,通过 MFU 对 SFU 与终端的通信资源进行集中式调度和精细化功率控制,显著提升了网络整体吞吐量。

2) 针对高密度环境下的场景,建立了详细的性能分析模型,分析了多 AP 协同通信性能随 SFU 数量变化的影响。仿真分析结果进一步表明,所提集中调度与功率控制方案在不同部署密度与网络负载下均具有稳定、高效的性能表现,展现出了在未来复杂、高密度 FTTR 场景中的应用潜力。

## 1 研究现状

早期的 Wi-Fi 标准主要关注单 AP 性能提升,对于 AP 之间的协作考虑较少。例如,早期的 Wi-Fi 标准(如 802.11n 和 802.11ac)主要通过更高阶调制、更宽频宽和多天线技术提升单链路吞吐量,对多个 AP 并存问题仅提供基本的射频规制来缓解干扰<sup>[12]</sup>。直到 802.11ax,才首次在协议中引入了针对多基本服务集 (BSS) 场景的空间复用 (SR) 机制。802.11ax 的 SR 机制关键特性包括: BSS Coloring 机制给不同 BSS 打上颜色标记,终端可以根据接收到的“颜色”判断信号是否来自外局域网,从

而在一定条件下允许并行传输；重叠BSS能量检测（OBSS-PD）机制允许设备调整载波侦听门限，如果邻居BSS信号低于一定强度则可以“忽略”而发起传输，从而提高并发度<sup>[13]</sup>。据文献[14]的分析，SR机制在高干扰场景下可提升介质利用率和并行传输数目，对网络吞吐量有较大提升。但是，SR机制仍然是分布式和保守的：每个设备都是独立判断是否可以同时传输，缺乏AP之间的协同决策，因此并不能完全避免碰撞或次优资源利用。因此，业界很快意识到协同式的多AP控制将是下一代Wi-Fi的发展方向。

在蜂窝系统中，协调多点（CoMP）是一种多个传输点合作以提高密集部署的蜂窝环境中蜂窝边缘吞吐量的技术，并且已经被LTE-A（long term evolution-advanced）采用<sup>[15]</sup>。在5G中，CoMP的扩展不仅用于提高吞吐量，还用于提高可靠性等其他要求<sup>[16]</sup>。受到CoMP思想的启发，Wi-Fi领域开始研究多AP协同（MAPC）技术，希望在本地WLAN环境下复用多个AP的能力，提高整体网络性能<sup>[7]</sup>。IEEE 802.11be（Wi-Fi 7）最初计划引入MAPC技术，但由于方案复杂度和芯片实现等原因，相关功能被推迟到IEEE 802.11bn（Wi-Fi 8）标准中讨论<sup>[17]</sup>。业界针对多AP协同提出了多种方案类型技术，包括协同正交频分多址（C-OFDMA）、协同波束成形（C-BF）、联合传输（C-JT）和协同空间复用（C-SR）<sup>[18]</sup>。其中，C-OFDMA通过频率资源单元复用提升吞吐量，C-BF通过天线波束成形减少干扰，而J-TX则通过多个AP向同一终端联合传输提升信号质量和吞吐量。虽然这些技术在一定场景下表现优秀，但它们通常依赖于较复杂的协调过程，尤其在高密度环境下，协调开销较大，且在动态网络中难以实现。

相比之下，C-SR因其较低的实施复杂性和较高的效率，成为最具前景的技术之一。C-SR指的是在多AP协调框架下，实现多个接入点的并行传输，以优化网络整体性能。具体而言，在一个传输机会（TXOP）期间，一组协同的AP将同时使用相同信道向各自的终端发送数据，通过调整AP的传输功率来减少干扰，并使所有终端能够以足够的信干噪比（SINR）进行通信。C-SR功能示意如图2所示。

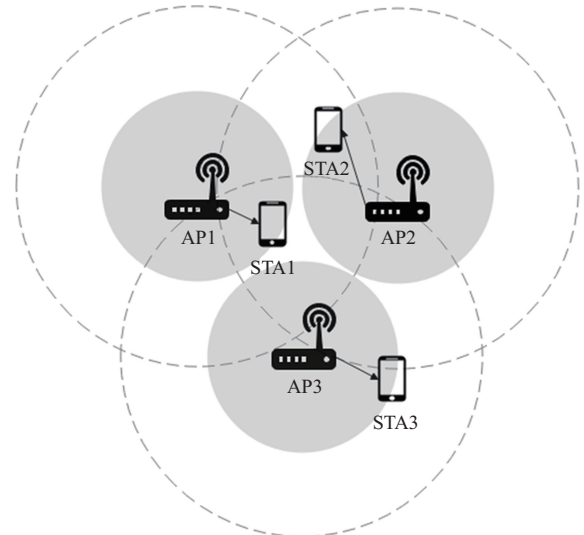


图2 C-SR功能示意

目前，学术界对C-SR技术展开了一系列的研究。文献[19]设计了一种基于干扰强度的分组策略，依据AP间的干扰系数动态划分协作组，使具有弱互扰关系的AP可并发通信，从而降低干扰并提升整体空间复用效率。文献[20]的研究则关注协作功能选择，提出基于AP-终端距离的协调功能切换模型，通过合理选择C-SR与C-BF功能，在不同部署环境下获得了性能的综合提升。考虑到无线环境的动态性，文献[21]提出了自适应C-SR方案，通过轻量判决准则动态选择参与协作的AP集合，实现在高干扰场景中缩小并发集、低干扰高负载时扩大并发集，从而优化吞吐与干扰之间的权衡。此外，还有文献[22]探索了基于强化学习的自适应算法，通过持续环境感知动态优化AP组调度，显著减少了协作开销并增强了干扰抑制能力。综上所述，这些研究从无线控制、自适应选择到分布式学习等多个角度，展示了C-SR技术在高密度、多业务场景下的广阔潜力。通过精细的算法设计与智能协作机制，C-SR正逐步发展为提升下一代Wi-Fi网络频谱效率与服务质量的关键手段。

尽管C-SR技术在提升多AP协同传输性能方面展现出广阔前景，现有研究仍存在若干关键不足。首先，IEEE 802.11标准并未定义统一的速率控制算法，当前多数文献在调度算法设计中忽略了物理层链路自适应速率控制的影响，未能充分考虑不同数据率对空间复用策略的适配性与干扰敏感度的反馈机制。其次，现有研究往往将C-SR调度机制与速率控制算法分离设计，未探索二者协同优化的潜

力,难以在干扰动态变化的密集部署场景中实现系统性能最优。此外,目前主流研究通常在MAC层建模中假设协作组之间不存在冲突与竞争,缺乏对真实信道接入过程、碰撞概率以及控制开销的精确建模,这与实际网络运行状况存在偏差。尤其在FTTR等高密度覆盖场景下,任意增加并发传输的数量可能适得其反,频繁的同频干扰将导致接收端SINR显著下降,进而影响信号解调成功率与链路速率。因此,未来研究亟须构建考虑速率控制、调度联合优化以及真实MAC层行为的完整分析框架,以实现C-SR技术在实用网络中的有效部署与性能保障。

## 2 C-WAN架构下多SFU协同方案

在C-SR技术中,通常依赖一个AP作为协调者,组织并管理网络中的并发传输。根据网络架构的不同,协调者可以是集中控制单元,也可以是在多个AP之间动态选举产生的一员。一种常见的协调方案是在BSS中设定一个共享的TXOP发起者,该发起者作为共享AP负责竞争信道并预留TXOP,随后通知其他协同AP共同进行数据传输。本文基于此思想,结合C-WAN架构的特点,设计了在MFU下行发送资源受限情况下的多SFU协同传输流程,并展开系统建模和调度算法的设计与实现,探讨如何在实际应用中优化资源调度,提升网络性能。

### 2.1 多SFU协调传输流程

C-WAN架构延续了“集中基带、分布射频”的设计思想:所有基带处理单元(BBU)集中部署于MFU,形成物理上的“基带池”;而射频拉远单元(RRU)则部署在各SFU,实现对终端的就近覆盖<sup>[23]</sup>。这种架构不仅显著提升了基带资源的复用效率,还简化了网络的运维管理。然而,为降低部署成本和提升资源利用率,BBU的数量通常小于SFU的实际数量,导致部分SFU在特定时刻可能无法获得可用的基带资源。如果继续使用传统的增强型分布式信道接入机制(EDCA)机制,在退避窗口归零的情况下,部分SFU将无法完成正常的数

据发送或接收,影响整体网络性能。

鉴于C-WAN架构本身具备中心化控制的能力,MFU作为网络调度中心,可以实时掌握各SFU的状态信息与队列情况,从而具备实现精细化、多维

度资源协调的基础。基于此,本文提出一种融合EDCA机制与SR策略的多SFU下行协同传输机制。在该机制中,SFU通过EDCA竞争信道获得TXOP后,由MFU统一调度,采用TDMA方式为其下关联的、有下行数据需求的终端分配发送时隙。同时,为提升BBU的利用效率,MFU还支持多个SFU并行发送下行数据,通过评估各SFU之间的接收信号强度(RSSI)关系,筛选干扰关系较弱的SFU组合,组织进行空间复用传输,从而进一步降低冲突概率,提高系统整体的下行传输效率与资源利用率。

该流程在维持基本EDCA竞争机制的基础上,引入MAP控制帧、TDMA时隙调度与空间复用策略,实现高效、可控的信道资源共享。整个流程包括以下4个阶段。

1) 竞争与信道抢占:所有SFU基于EDCA机制独立执行窗口退避,竞争共享信道。当某一SFU最先完成退避计时后,即获得当前TXOP的主导权,被称为“共享SFU”。该SFU立即向网络广播一帧称为MAP-RST(MAP request start)的控制帧,其结构参考MU-RTS帧设计,确保标准兼容性与解析友好性。MAP-RST中携带由MFU预先选定、最多不超过BBU资源数量的其他协同SFU的MAC地址,表示本次可参与空间复用的协同传输成员。

2) 协同组确认:收到MAP-RST帧的SFU,如果其MAC地址出现在协同列表中,则立即回复MAP-CTS(MAP clear to send)帧,表示加入本轮传输协同组,并将自身退避窗口强制清零,进入就绪状态。未被选中的SFU会根据MAP-RST中携带的NAV(network allocation vector)字段设置退避期,暂停一段时间的数据竞争。该NAV时间由MFU计算得出,其依据是由共享SFU当前关联的、具有下行数据待发送的终端数量确定所需的TDMA时隙数,进而决定NAV的持续时间,确保本次TXOP在分配完成前不会受到外部干扰。

3) 集中调度与动态MAP-TF(MAP trigger frame)触发:在信道抢占成功后,MFU立即启动该协同组的多SFU协调传输流程。为降低空间复用过程中的互扰风险,MFU会基于各SFU间的信号强度与终端分布,集中完成发射功率的计算与配置。由于TDMA调度并非一次性下发,而是按照

每个时隙动态执行：在每个 TDMA 时隙开始前，MFU 会将调度结果发送给共享 SFU，共享 SFU 随后广播一帧 MAP-TF，通知所有协同 SFU 该时隙的具体传输安排，其中的信息包括时隙持续时间、发送功率等。

4) 数据发送与反馈：所有协同 SFU 根据 MAP-TF 配置，在分配的时隙中依次进行下行数据传输。传输结束后，各 SFU 将传输结果反馈至 MFU，供后续调度参考。此过程完成后，NAV 时间结束，其他 SFU 恢复信道访问，系统进入下一轮竞争与调度流程。多 AP 协同传输流程如图 3 所示。

### 2.2 多 SFU 协调传输方案

要实现上述多 SFU 的并行下行传输，关键在于干扰感知与发射功率控制的精细配合。MFU 必须感知网络中各 SFU 之间以及 SFU 与非本终端之间的信号强度关系，从而识别出可同时发送而不会引发严重干扰的“兼容”SFU 组合。这一过程通常依赖于 RSSI 等链路质量指标。得益于 C-WAN 架构中 MFU 对 SFU 的集中连接与全网感知能力，获取这类链路状态信息在系统设计上较容易实现。因此，协同调度不再依赖分布式信令交互，而是可以由 MFU 在中心位置基于全局信息做出快速决策。

鉴于对所有可能的 SFU 协同组合、传输对匹配及功率配置进行穷举会引发组合爆炸，使计算复杂度呈指数级增长并难以满足 TXOP 级实时性，提出一种高效的两步式协同方法：在每个 TXOP 周期，先筛选一组可并行调度的 SFU 协同组，随后

匹配最优的 SFU-终端传输对，并为其分配合适的发射功率，以在可控干扰风险下最大化系统下行吞吐量。

具体而言，在 C-WAN 架构中，MFU 配备有有限数量的 BBU 资源，数量为  $N_B$ ，用以支持并发下行传输。设在每个 TXOP 周期内，当某个 SFU 成功竞争信道并获得 TXOP 主导权后，MFU 将根据网络当前状态动态选取最多  $N_B$  个 SFU 组成协同传输组，每个 SFU 服务一组终端  $N_u$ 。该 TXOP 周期内的传输调度进一步划分为若干个 TDMA 时隙，每个时隙时长为  $T$ ，其数量由共享 SFU 队列中下行数据待发送的终端数目决定。

为简化分析，本文假设网络中的干扰仅源于协同组内同时发送数据的不同 SFU。对于任意协调组中的 SFU， $s$  在时隙  $t$  的下行发送，其发射功率表示为  $P_{st}$ ，且受到最大功率约束  $P_{st} \leq P_{max}$ 。利用 MFU 对网络状态的集中感知能力，假定其可获知任意 SFU 至任意终端之间的信道增益  $h_{st}^u$ ，从而为后续优化调度提供输入数据。信道模型采用符合 802.11ax 环境的 TGax 模型，其路径损耗表达式为

$$P_L = 40.05 + 20 \lg \left( \frac{\min(d, B_p) f_c}{2.4} \right) + P' + 7W_n \quad (1)$$

首先获取 SFU 协同组。由于仅靠相对位置不足以度量 SFU 间干扰。两 SFU 的干扰强度实则取决于其覆盖用户的接收质量。因此，本文用两 SFU 同时传输时，用户传输速率因干扰项增加而下

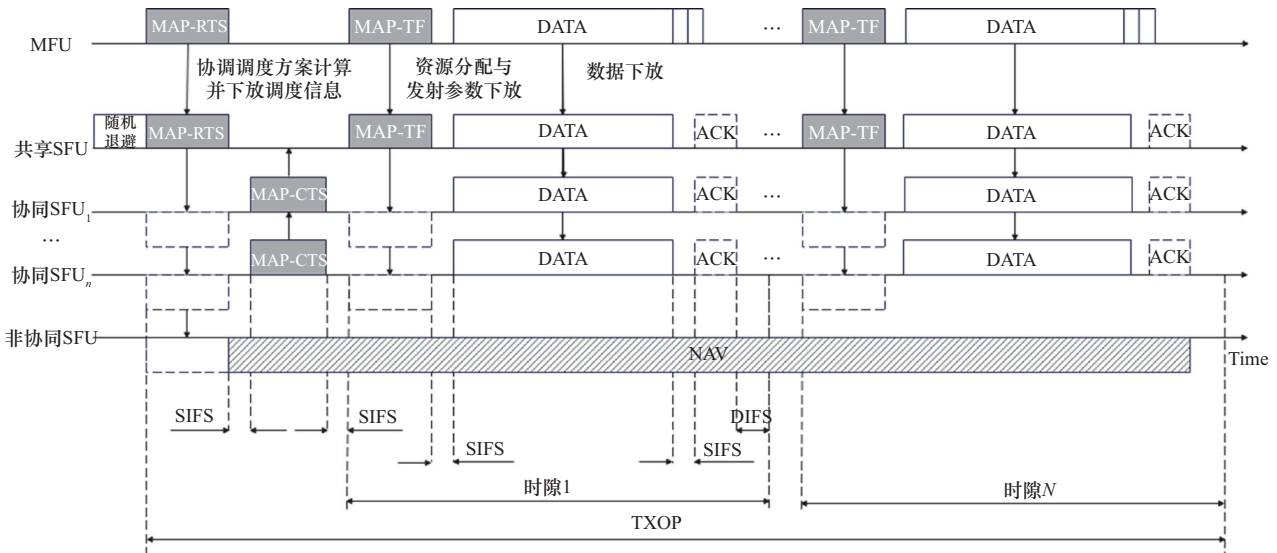


图 3 多 AP 协同传输流程

降的程度来评估两 SFU 的干扰。具体地, 对 SFU  $s$  下关联的终端  $u$ , SFU  $s'$  的干扰强度定义为

$$e_{s,s'}(u) = 1 - \frac{\log\left(1 + \frac{\bar{P}|h_{st}^u|^2}{\sigma^2 + \bar{P}|h_{s't}^u|^2}\right) + \log\left(1 + \frac{\bar{P}|h_{s't}^u|^2}{\sigma^2 + \bar{P}|h_{st}^u|^2}\right)}{\log\left(1 + \frac{\bar{P}|h_{st}^u|^2}{\sigma^2}\right) + \log\left(1 + \frac{\bar{P}|h_{s't}^u|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

其中,  $\bar{P}$  表示一个参考/平均功率。

若  $s$  和  $s'$  到终端  $u$  的信道增益相近且都明显大于噪声, 则  $e_{s,s'}(u)$  较大, 表明两者并发会明显劣化  $u$  的传输速率; 反之, 若  $s$  的信道远强于  $s'$ , 那么即使  $s'$  并发, 其产生的干扰相对有限,  $e_{s,s'}(u)$  较小。进一步地, 对所有终端取平均, 得到两 SFU 的成对干扰权重为

$$E_{s,s'} = \frac{1}{2N_u} \left( \sum_{u=1}^{N_u} e_{s,s'}(u) + \sum_{u=1}^{N_u} e_{s',s}(u) \right) \quad (3)$$

据此, 为避免强干扰, 当某个 SFU 获得发送机会时, 将基于  $E_{s,s'}$  来选择协同组成员, 当每次新的 SFU 准备加入协同组时, 检查其与当前协同组内所有成员的成对指标是否均不超过阈值  $\gamma$ , 若满足则纳入协同组; 否则拒绝, 直至无法再加入或已达到上限  $N_B$ 。在 SFU 选取过程中还可引入公平性策略: 对近期已参与协同传输的 SFU 施加惩罚或暂不重复选取, 以提升终端覆盖与服务公平性。

在获取完 SFU 协同后, 需要获取协同组内的最佳调度。为系统性地刻画设计可行的调度与功率控制算法, 本文进一步建立了 SFU 协调组传输的系统模型。根据系统设计和公平性原则, 可以得到以下关键约束: C1, 每个 SFU 的一个时隙只能分配一个用户; C2, 每个终端在一个 TXOP 周期内最多被调度一次; C3, 每个 SFU 在任一时隙中的发送功率不得超过最大功率限制。在 C-SR 中, 由于 AP 之间会发生干扰, 需要考虑对于干扰功率进行适当的配合, 目标是最大化速率和。最终的目标函数为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{s,u,t} X_{sut} \text{lb} \left( 1 + \text{SINR}_{st}^u \right) \\ & \text{s.t. } C_1: \sum_u X_{sut} = 1 \\ & \quad C_2: \sum_t X_{sut} \leq 1 \\ & \quad C_3: X_{sut} \in \{0,1\} \end{aligned}$$

$$C_4: P_{st} \leq P_{\max} \quad (4)$$

其中,  $X_{sut}$  为二进制变量, 若 SFUs 下关联的终端  $u$  分配到时隙  $t$ , 则  $X_{sut} = 1$ ; 这里的表达式分别对应了约束条件。SINR 的表达式为

$$\text{SINR}_{st}^u = \frac{P_{st}|h_{st}^u|^2}{\sigma^2 + \sum_{s' \neq s} P_{s't}|h_{s't}^u|^2} \quad (5)$$

这是一个典型的混合正式非线性规划问题, 函数本身和约束条件是非凸的, 直接使用传统的凸优化解决方法难度较大, 且直接求解可能出现组合爆炸的情况。在文献[24]的启发下引入图论方法来构建联合调度和功率控制图的调度方式。

### 2.3 SFU 协同组内调度和功率分配

本节将联合协调调度与功率控制优化问题等价地转化为一个最大权重团问题, 所提联合调度与功率控制方法是集中式的, 所有计算都在 MFU 进行, 然后将结果发送给共享 SFU。

定义  $A$  表示所有 SFU 和其对应终端之间的传输关联集合, 定义为  $A = S \times U$ , 其中  $y \in A$  表示一个具体的关联, 例如在一个存在 2 个 SFU 并分别连接了一个终端的场景下, 所有的 SFU 和终端传输组成的集合为  $A = \{(s_1, u_{1,1}), (s_2, u_{2,1})\}$ , 其中  $y = (s_1, u_{1,1})$  表示 SFU 1 和其下关联的终端 1 之间的传输。现在定义映射函数  $\varphi_s(y) = s_i$ , 表示传输组合中 SFU  $s_i$ ;  $\varphi_u(y) = u_{i,n}$ , 表示传输组合中终端对应的 SFU 和设备编号  $u_{i,n}$ 。

对于某个时隙  $t$ , 网络中的功率控制图表示为  $G_t(V_t, E_t)$ , 是一个无向图, 其中  $V_t$  和  $E_t$  分别表示该  $s$  时隙下图的顶点集和边集。顶点集的生成需要满足约束条件 C1, 即每个 SFU 在一个顶点里只能给一个设备传输。在集合  $A$  中, 任意一个满足这样条件的组合称为一个可行调度, 记为  $f$ , 所有的可行调度集合用  $F$  表示。一个顶点  $v \in V$  对应一个可行调度  $f \in F$ , 其满足所有关联中的 SFU 不相同, 即  $y_1, y_2 \in f$ , 有  $\varphi_s(y_1) \neq \varphi_s(y_2)$ 。

给定某个功率分布  $P$ , 本文可以为每个顶点定义一个“权重”来反映其对系统总吞吐量的贡献。即顶点  $v$  的权重为其关联中所有 SFU 给其对应终端的传输速率之和。该权重定义为

$$w(v) = \sum_{y \in f} \text{lb} \left( 1 + \text{SINR}_{\varphi_u(y)}(P) \right) \quad (6)$$

由于一个 TXOP 的持续时间较短，并且 Wi-Fi 的室内环境下移动较慢，因此可以认为在一个 TXOP 里信道增益矩阵是不变的，即  $h_{s1}^u, \dots, h_{st}^u$  是相同的。因此在不同时隙下相同关联方式的功率分布是相同的，可以使用同一个顶点  $v$ 。此时某个时隙下的功率控制图  $G_t(V, E_t)$  就可代表全局功率控制图  $G(V, E)$ 。

每个顶点  $v \in V$  关联时，对于任意 2 个顶点  $v_1, v_2 \in V$  对应的调度  $f_1, f_2 \in F$ ，满足约束条件 C2，每个终端在一个 TXOP 周期内最多被调度一次， $\delta(\cdot)$  为离散狄拉克函数，则其数学表达式为

$$\delta(\varphi_s(y_1) - \varphi_s(y_2)) \times \delta(\varphi_u(y_1) - \varphi_u(y_2)) \neq 0, \forall (y_1, y_2) \in f_1 \times f_2 \quad (7)$$

一个 TXOP 周期下，一个可行的调度记为有序族  $\{f_1, f_2, \dots, f_T\}$ ，任意 2 个调度之间满足式(7)，此时可行调度对应的顶点集为  $\{v_{f_1}, v_{f_2}, \dots, v_{f_T}\}$ ，因此顶点集中任意 2 点都相互连接，因此构成了一个大小为  $T$  的团；反之，若  $\{v_{f_1}, v_{f_2}, \dots, v_{f_T}\}$  之间相互关联，此时将其任意按序执行  $\{f_1, f_2, \dots, f_T\}$  则可得到  $T$  时隙的可行调度。由此构造可得一个可行调度的时隙数等于其构造的顶点数。

图中的最大团是指任意 2 个不同顶点之间都存在一条边连接，并且顶点数最多的团。由于可行调度对应一个团，进一步地，在顶点集一个周期对每个终端恰好一次覆盖的约束条件下，该团必为最大团。若存在更大的团，则该可行调度则不满足每个终端被传输一次，故不能得到更大的团，当前团即为最大团。反向地，若某最大团未覆盖某终端，则可将服务该终端的极大并发集合加入而不破坏两两相邻性，从而得到更大的团，与最大团矛盾。因此按照式(7)生成的图中一个最大团等价于一个可行的调度，且最大团的顶点数即为该调度的时隙数。

那么考虑由上述规则构建的图  $G(V, E)$ ，定义  $C$  为所有最大团组成的集合，每个顶点有对应的权重，那么优化问题就可以被重新表述为最大权重团问题，即

$$\arg \max_{c \in C} \sum_{v \in c} w(v) \quad (8)$$

联合调度功率分配如图 4 所示，包含了 MFU 有 2 个 BBU 资源，且每个 SFU 有 3 个终端下，抢占

到信道的 SFU 的联合调度功率分配。图 4 中每个顶点表示一个时隙的调度方案，每个顶点之间的连线表示其满足式(8)的相容性判定。实线示例的 3 个顶点两两相连，构成大小为 3 的最大团，对应“每个终端恰好一次”的 3 时隙调度。

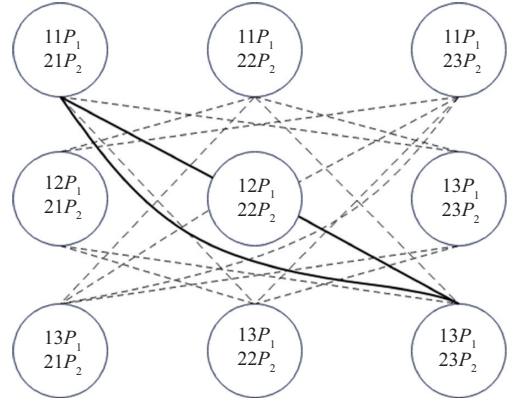


图 4 联合调度功率分配

因此，本文提出一种基于 C-WAN 架构的联合协调调度和功率优化方案。其核心思路是，针对每个功率控制子图中的顶点，先独立地求解该顶点对应终端组合的最优功率分配，然后将整体调度与功率优化问题转化为在功率控制图上求解最大权重团，高效地获得最优解。

考虑功率控制图中的某一顶点  $v \in V$ ，该顶点对应的调度  $f \in F$ ，该顶点的功率分布  $P$  由调度的集合数决定，即最优功率分配  $(P_1, \dots, P_s)$  使其总接收吞吐量最大化，即求解优化问题为

$$\max \sum \text{lb} \left[ 1 + \frac{P_s |h_s^u|^2}{\sigma^2 + \sum_{s' \neq s} P_{s'} |h_{s'}^u|^2} \right] \quad \text{s.t. } 0 \leq P_s \leq P_{\max}, \forall P_s \in P \quad (9)$$

可以看到，某个 SFU 的功率不仅受其自身设定影响，还受到其他 SFU 在同一时隙上调度终端及其功率设定的影响。以上的优化问题是一个著名的非凸问题，其求解在一般情况下是困难的。然而，已有若干高效的算法可以求得其全局或近似最优解，例如文献[25]、文献[26]中提出的方法。本研究提框架允许使用任意一种已知的功率优化算法来解决该问题，从而为后续构建整体多 AP 协调图提供顶点权重基础。考虑到 MFU 的计算资源有限，这里采用文献[25]中的 IFEM 算法，在计算复

杂度低的同时实现了优良的系统吞吐量表现,其表达式为

$$P_s^u(t+1) = \left[ \left( \sum_{j \neq s} \sigma^2 + \sum_{i \neq j} P_i^u(t) |h_i^u|^2 \right)^{-1} \right]_{-1}^{S_{\max}} \quad (10)$$

求解最大权重团问题也是一个NP问题,相比于遍历的暴力解法,可以通过文献[27]、文献[28]减少复杂度的方法高效地求解此问题,这里选择使用贪心算法,每次选择最大权重的顶点。按序选择的顶点中的终端组合方式和功率分配就作为对应时隙的发送方案。

### 3 多SFU协同的性能分析

为了进一步验证本文基于C-WAN架构的多SFU协同传输机制在实际应用场景中的性能优势,本节构建适用于Wi-Fi网络的协同传输分析模型,通过引入更贴近MAC层实际运行行为的细节,准确刻画多SFU协同传输机制的性能特点。

#### 3.1 网络模型

为简化分析,本文采用以下典型网络结构和建模假设:系统由 $N_s$ 个SFU组成,所有SFU工作在相同信道并通过光纤连接至同一个MFU,假设SFU之间不存在外部网络干扰,仅考虑网络内SFU之间同时发送造成的协作组内干扰情况;每个SFU下服务 $N_u$ 个终端,本文仅考虑网络下行传输的情况,所有终端具有饱和的数据发送需求,即SFU每次协同传输都会给所有关联的终端发送数据;为建模多AP协同调度过程中SFU的信道接入行为,本文采用基于EDCA的退避竞争机制,设初始竞争窗口大小为 $W_0 = CW_{\min}$ ,最大退避窗口为 $W_m = CW_{\max}$ 。系统在发生冲突时,SFU将进入更高的退避阶段,其竞争窗口大小按指数方式增长。 $m = \text{lb} \left( \frac{CW_{\max}}{CW_{\min}} \right)$ 表示退避窗口增长的最大指数级数, $R$ 为最大重传次数限制。具体地,第 $i$ 次退避阶段下的窗口大小 $W_i$ 表达为

$$W_i = \begin{cases} 2^i W_0, & 0 \leq i < m \\ 2^m W_0, & m \leq i \leq R \end{cases} \quad (11)$$

进一步地,借助经典的Bianchi模型<sup>[29]</sup>,可用式(12)表达系统整体的吞吐量性能,即

$$S = \frac{P_{\text{succ}} E[P]}{E[\text{slot}]} = \frac{P_{\text{succ}} E[P]}{P_e \sigma + P_{\text{succ}} T_{\text{succ}} + P_{\text{coll}} T_{\text{coll}}} \quad (12)$$

其中, $E[\text{slot}]$ 表示完成一轮TXOP传输所需要消耗的平均时隙时间,包括3种情况的加权期望空闲、发送成功和出现碰撞的情况, $P_{\text{succ}}$ 表示系统中仅有一个SFU成功竞争信道的概率, $P_{\text{coll}}$ 表示发生碰撞的概率, $P_e$ 表示信道处于空闲状态的概率,令 $\tau$ 为SFU的发送概率,其中 $P_{\text{succ}} = n\tau(1-\tau)^{n-1}$ , $P_e = (1-\tau)^n$ , $P_{\text{coll}} = 1 - P_{\text{succ}} - P_e$ 。 $E[P]$ 是单次成功传输的数据帧长度期望, $\sigma$ 、 $T_{\text{succ}}$ 、 $T_{\text{coll}}$ 分别代表了空闲时间、成功传输和碰撞传输所花费的平均时长,空闲时间为系统的一个时隙时间。此外,由于本文提出了基于TDMA时隙的协同调度机制,因此上述成功传输时长 $T_s$ 和碰撞传输时长 $T_c$ 表达式分别为

$$T_{\text{succ}} = T_{\text{MAP-RST}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{MAP-CTS}} + T_{\text{SIFS}} + \sum_i^m T_i^{\text{c-slot}} \quad (13)$$

$$T_{\text{coll}} = T_{\text{MAP-RST}} + T_{\text{DIFS}}$$

其中, $m$ 是TDMA协调时隙的数量, $T_i^{\text{c-slot}}$ 是第 $i$ 个协调时隙的持续时间。 $T_i^{\text{c-slot}}$ 的持续时间取决于其中最长传输的持续时间。

$$T_i^{\text{c-slot}} = T_{\text{MAP-TF}} + T_{\text{SIFS}} + \max\{T_{\text{trans}}\} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{DIFS}} \quad (14)$$

因此只需要求解出发送概率 $\tau$ 就可以算出系统吞吐量。

#### 3.2 二维马尔可夫链

为更精准地描述SFU在协同机制下的竞争行为,本文采用了二维离散时间马尔可夫链模型,以细致分析SFU信道竞争过程的状态转移特征。该模型考虑了协同传输机制引入后SFU退避窗口变化的特殊性,即SFU可能在未成功争夺信道但被MFU选入协同组时,强制重置退避阶段。

在本模型中,设SFU的状态用二元组 $(i,k)$ 表示,其中, $i \in [0,R]$ 表示当前退避阶段, $k \in [0, W_i - 1]$ 表示退避计数器的值。不同于经典Bianchi模型,本文模型中SFU在未成功争夺信道但被MFU纳入协同传输组时,其状态会直接回到初始退避阶段,定义这一转移概率为 $P_{\text{fo}}$ 。当SFU与其他节点发生冲突时,其退避阶段提升,概率为 $P_c$ 。多AP协同下单个SFU退避过程的马尔可夫链模型如图5所示。

该模型的状态转移概率具体定义为

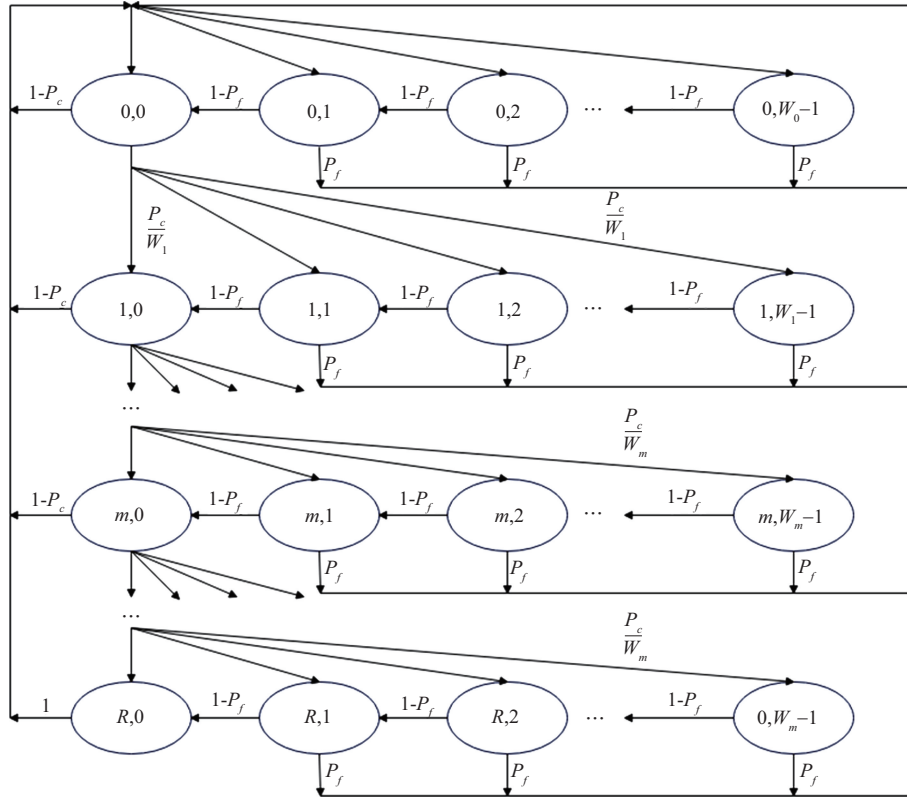


图 5 多 AP 协同下单个 SFU 退避过程的马尔可夫链模型

$$\begin{cases}
 P\{i,k|i,k+1\} = 1 - P_f, & k \in [0, W_i - 1], i \in [0, R] \\
 P\{0,k|i,0\} = \frac{1 - P_c}{W_0}, & k \in [0, W_0 - 1], i \in [0, R - 1] \\
 P\{0,k|R,0\} = \frac{1}{W_0}, & k \in [0, W_0 - 1] \\
 P\{0,k|i,\dot{k}\} = \frac{P_f}{W_0}, & k \in [0, W_0 - 1], \dot{k} \in [1, W_i - 1], i \in [0, R] \\
 P\{i,k|i-1,0\} = \frac{P_c}{W_{i+1}}, & k \in [0, W_i - 1], i \in [0, R]
 \end{cases} \quad (15)$$

通过平稳状态方程组，可求得

$$b_{i,0} = b_{i-1,0} A_i \frac{P_c}{P_f}, \quad i \in [1, R] \quad (16)$$

其中， $A_i$  为

$$A_i = \frac{[1 - (1 - P_f)^{W_i}]}{W_i}, \quad i \in [0, R] \quad (17)$$

此时关注  $i = 0$ ，有

$$b_{0,0} = \frac{A_0}{W_0} [(1 - P_c) \sum_{i=0}^{R-1} b_{i,0} + b_{R,0} + P_f \sum_{i=0}^R \sum_{k=1}^{W_i-1} b_{i,k}] \quad (18)$$

结合归一化条件，有

$$\sum_{i=0}^R \sum_{k=1}^{W_i-1} b_{i,k} = 1 - \sum_{i=0}^R b_{i,0} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)可得

$$b_{0,0} = \frac{A_0}{1 - X} \quad (20)$$

其中， $X$  为

$$\begin{aligned}
 X = & \frac{A_0}{P_f} \left[ (1 - P_c - P_f) \left( 1 + \sum_{i=1}^{R-1} \prod_{j=1}^i \left( A_j \frac{P_c}{P_f} \right) \right) + \right. \\
 & \left. (1 - P_f) \prod_{j=1}^R \left( A_j \frac{P_c}{P_f} \right) \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

则一个传输时隙内任意 SFU 尝试发送的概率为所有  $b_{i,0}$  之和，即  $\tau$  为

$$\tau = \sum_{i=0}^R b_{i,0} = \frac{A_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^i \left( A_j \frac{P_c}{P_f} \right) \right)}{1 - X} \quad (22)$$

可以看到 $\tau$ 是跟 $P_c$ 和 $P_f$ 是相关的,发生冲突的概率为 $P_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1}$ ;被选入协同发送组的概率 $P_f$ 为网络中正好有一个其他的SFU抢占到信道并选择该SFU作为协调组成员的概率。为方便计算,这里假设MFU在选择协同组时,所有SFU的选择是等概率的,并选取 $N_B - 1$ 个成员(其中 $N_B$ 为系统的BBU资源数),因此其表达式为 $P_f = (N_B - 1)\tau(1 - \tau)^{n-2}$ ,联立3个方程即可求解发送概率 $\tau$ 。

为进一步评估本文多SFU协同机制对终端体验的影响,引入传输时延 $D$ 作为关键性能指标之一,其定义为SFU获取一次TXOP并将数据包传输的时间间隔。设 $E[X]$ 为成功数据包传输所需的平均时隙时间数。 $E[X]$ 为成功传输一个数据包所需消耗的平均时隙数,该值可综合考虑数据包在不同退避阶段经历的平均退避时间。具体而言, $E[X]$ 表示未被丢弃的数据包最终成功传输所需的平均等待时隙数,涵盖了从初始竞争至最终传输完成的整个过程时隙消耗。基于上述定义,成功传输的数据包的平均数据包时延 $E[D]$ 计算式为

$$E[D] = E[X]E[\text{slot}] = \sum_{i=0}^R \left[ \frac{1}{W_i} (1 + (W_i - 1)P_f + \sum_{k=0}^{W_i-2} (1 + kP_f) \times (W_i - k)(1 - P_f)^{W_i-1-k}) \frac{P_c^i - P_c^{R+1}}{1 - P_c^{R+1}} \right] E[\text{slot}] \quad (23)$$

## 4 仿真分析

为验证本文多AP协同算法的性能,采用MATLAB进行仿真实验。仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

仿真参数	参数值
下链路带宽/MHz	40
$W_0$	16
$m$	4
$R$	6
$P_s^{\max}/\text{dbm}$	20
$T_{\text{MAP-RST}}/\mu\text{s}$	80
$T_{\text{MAP-CST}}/\mu\text{s}$	62
$T_{\text{SIFS}}/\mu\text{s}$	16
$T_{\text{DIFS}}/\mu\text{s}$	34
$\delta/\mu\text{s}$	9

首先考虑一个20 m×20 m的区域,保持4个SFU的位置固定,通过改变终端的部署位置形成2种不同的终端分布场景,并分析不同分布下系统的吞吐量表现。不同终端分布场景下的吞吐量如图6所示。在图6(a)所示的场景1中,各终端均分布在距离其关联SFU较近的位置,且远离其他SFU的覆盖范围,因此跨SFU干扰较弱,空间复用潜力较高。在图6(b)所示的场景2中,终端分布相对密集,部分终端位于多个SFU覆盖范围的重叠区域,在并行传输时相互间的干扰显著增强,从而对空间复用增益造成限制。

针对上述2种终端分布,分别在RTS/CTS模式及协同模式下进行吞吐量对比,协同模式中BBU数量设置为2、3和4。仿真结果表明,在场景1和场景2中,传统RTS/CTS模式的系统总吞吐量约为26 Mbit/s;而在协同模式下,在场景1中,BBU数量为2、3、4时,吞吐量分别提升至约48 Mbit/s、59 Mbit/s和73 Mbit/s,体现了在低干扰、高空间复用潜力环境下协同机制的显著优势。在场景2中,RTS/CTS模式的吞吐量约为26 Mbit/s,BBU数量为2、3、4时分别达到约41 Mbit/s、44 Mbit/s和46 Mbit/s。由于该场景中终端分布密集且跨SFU干扰显著,空间复用的有效组合数量减少,吞吐量增益相较场景1明显下降,但仍优于传统RTS/CTS模式。

总体来看,终端位置分布对多SFU协同机制的增益有重要影响:在终端与自身SFU距离较近、跨SFU干扰较低的部署下,协同调度结合更多BBU资源可充分释放空间复用潜力;而在干扰较强的密集部署环境中,增益幅度受限,但依然能够提升系统整体吞吐量。

在进一步的仿真中,本文固定场景尺寸为20 m×20 m,保持SFU的空间分布均匀,将其数量从6增加至40,以模拟在高密度部署条件下系统性能的变化趋势。BBU数量分别设置为2、3和4,并与传统RTS/CTS模式进行对比分析。本部分重点考察基于理论建模计算SFU平均发送概率、系统吞吐量及平均服务时延3个指标。

不同模式下单个SFU的发送概率如图7所示。由图7可以观察到,随着SFU数量的增加,所有模式下的发送概率均呈下降趋势,这是因为密集部署下竞争节点数量增加,导致单个SFU获得信道的机会降低。在相同SFU数量条件下,协同模式的

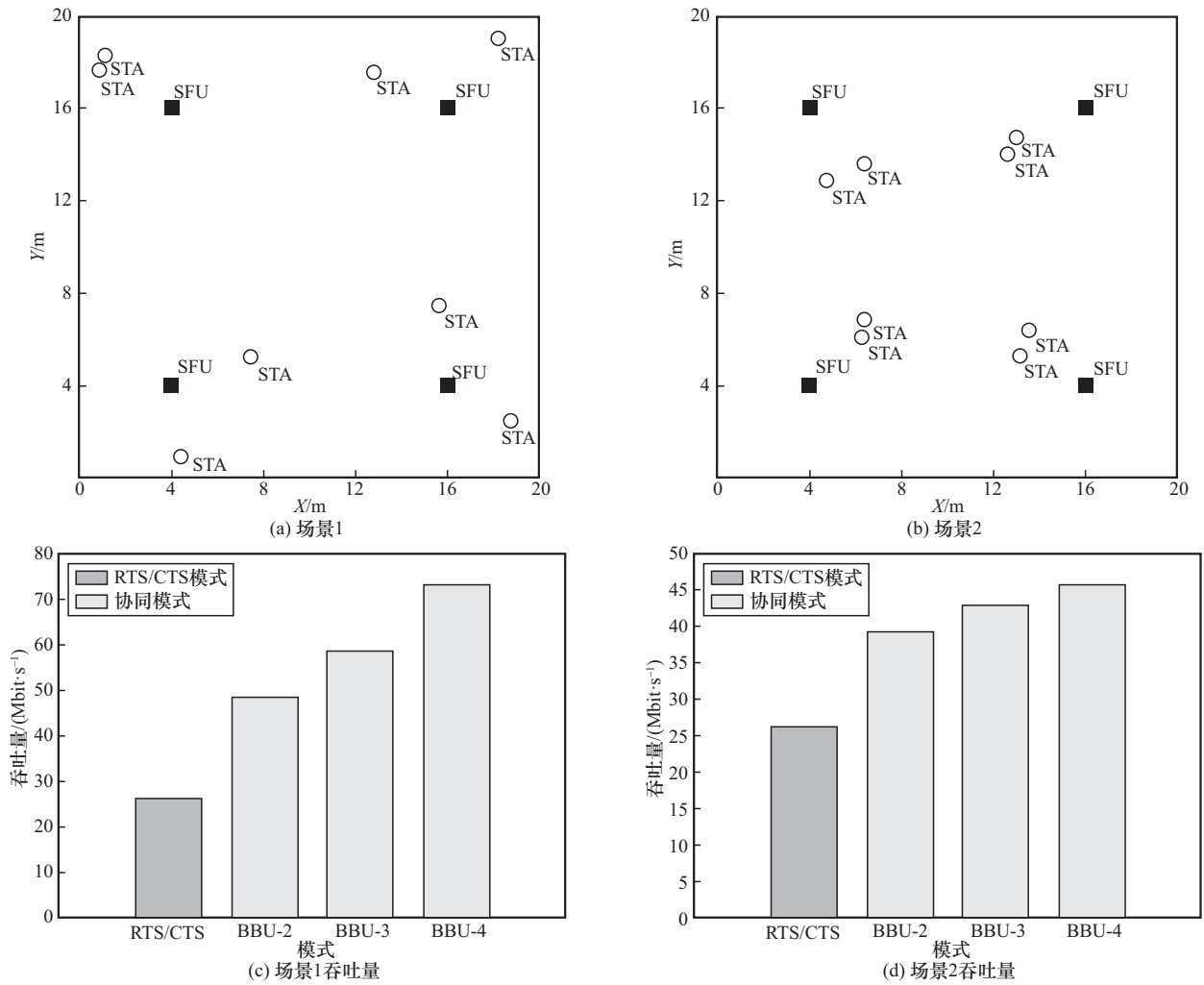


图6 不同终端分布场景下的吞吐量

发送概率显著高于传统 RTS/CTS 模式，且 BBU 数量越多，发送概率越大，这是由于 BBU 数量越多就越有可能被选为协同 SFU 参与传输，并且 SFU 处于低退避阶段的概率较大。

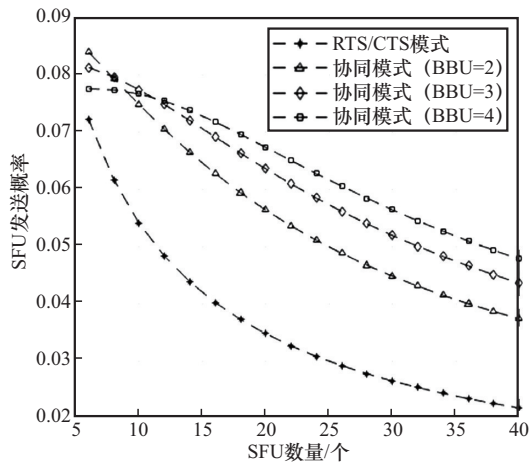


图7 不同模式下单个SFU的发送概率

不同模式下的系统吞吐量如图 8 所示。从图 8 可以看出，理论值与仿真结果高度吻合，验证了所建立模型的准确性。在传统 RTS/CTS 模式下，随着 SFU 数量的增加，吞吐量持续下降且降幅较为平缓；而在协同模式下，虽然整体吞吐量始终显著高于 RTS/CTS 模式，但其下降趋势相对更为明显。这是由于协同机制在高发送概率条件下受到并发干扰和调度开销的影响。尽管如此，在相同 SFU 数量下，协同模式依然保持明显优势，例如当 BBU=4 且 SFU 数量为 40 时，吞吐量仍较 RTS/CTS 模式提升超过一倍，说明本文的协同机制在高密度场景下依然具备显著的容量优势。

不同模式下的 SFU 平均服务时延如图 9 所示。从图 9 可以看到，随着 SFU 数量的增加，所有模式下的时延均呈线性上升趋势，但协同模式下时延显著高于 RTS/CTS 模式。这主要有 2 个原因：一方

面,协同模式中SFU需等待调度分配,并在分配的TDMA时隙内顺序或并行完成数据传输,相比TS/CTS模式增加了调度与等待开销;另一方面,由于协同机制显著提高了SFU的发送概率,导致其在高密度场景下的并发尝试次数增多,碰撞概率相较RTS/CTS模式更高,从而进一步增加了平均服务时间。然而,与吞吐量提升带来的系统整体性能改善相比,这一时延增加是可接受的。特别是在BBU数量较高的情况下,尽管单包时延有所上升,但总体传输效率显著提高,适用于对吞吐量敏感的高密度应用场景。

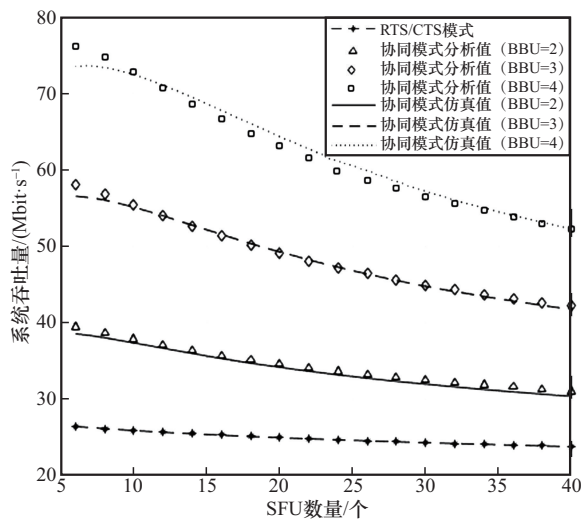


图8 不同模式下的系统吞吐量

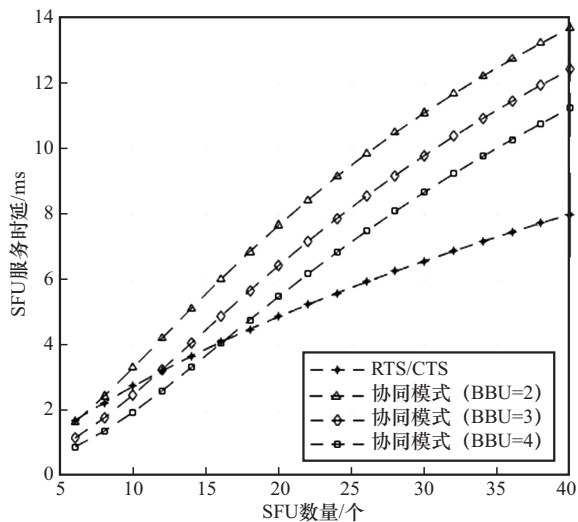


图9 不同模式下的SFU平均服务时延

## 5 结束语

本文提出基于C-WAN架构的多SFU下行协同

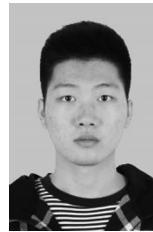
传输方案,并结合MAC层建模与仿真验证了其性能优势。结果表明,该方案在不同场景下均能显著提升系统吞吐量,尤其在低干扰环境中优势突出。尽管高密度部署会带来一定的时延增加,但整体容量提升明显,具备工程可行性,为未来多AP协同技术优化与标准化提供了参考。

## 参考文献:

- [1] VERMA S, KAWAMOTO Y, KATO N. A smart Internet-wide Port scan approach for improving IoT security under dynamic WLAN environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 11951-11961.
- [2] IEEE. IEEE 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 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN: IEEE Std 802.11ax-2021[S]. 2021.
- [3] SHI D Q, LIU F Q, YUTIAN Q, et al. A WLAN-based positioning system for indoor augmented reality services[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 420-424.
- [4] CHACCOUR C, SOORKI M N, SAAD W, et al. Can terahertz provide high-rate reliable low-latency communications for wireless VR? [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(12): 9712-9729.
- [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] 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.
- [7] VERMA S, RODRIGUES T K, KAWAMOTO Y, et al. A survey on multi-AP coordination approaches over emerging WLANs: future directions and open challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(2): 858-889.
- [8] PESANDO L, FISCHER J K, SHARIATI B, et al. Standardization of the 5th generation fixed network for enabling end-to-end network slicing and quality-assured services[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2023, 6(4): 96-103.
- [9] CAI J, ZHANG X, WANG X, et al. Fiber to the Room: key technologies, challenges, and prospects[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2504.20433, 2025.
- [10] 李俊玮, 虞淼, 张珊, 等. 千兆时代FTTR技术发展和标准化研究[J]. 信息技术与政策, 2023(10): 9-15. LI J W, YU M, ZHANG S, et al. Development and standardization of FTTR technology in the gigabit era[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2023(10): 9-15.
- [11] NUNEZ D, WILHELMI F, AVALLONE S, et al. TXOP sharing with coordinated spatial reuse in multi-AP cooperative IEEE 802.11be WLANs[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 864-870.

- [12] ALIN M A, HOSSAIN M D. Wireless evolution: IEEE 802.11n, 802.11ac, and 802.11ax performance comparison[J]. International Journal on AdHoc Networking Systems, 2024, 14(1): 24-30.
- [13] JUNG J, BAIK J, KIM Y, et al. OTOP: optimized transmission power controlled OBSS PD-based spatial reuse for high throughput in IEEE 802.11be WLANs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(19): 17110-17123.
- [14] WILHELM F, BARRACHINA-MUÑOZ S, CANO C, et al. Spatial reuse in IEEE 802.11ax WLANs[J]. Computer Communications, 2021, 170: 65-83.
- [15] IRMER R, DROSTE H, MARSCH P, et al. Coordinated multipoint: concepts, performance, and field trial results[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): 102-111.
- [16] SOLAJIJA M S J, SALMAN H, KIHARO A B, et al. Generalized coordinated multipoint framework for 5G and beyond[J]. IEEE Access, 2021, 9: 72499-72515.
- [17] NUNEZ D, WILHELM F, GALATI-GIORDANO L, et al. Spatial reuse in IEEE 802.11bn coordinated multi-AP WLANs: a throughput analysis[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2024: 265-270.
- [18] 刘剑钊, 葛晓虎, 郑艳烈, 等. FTTR场景下空间复用与速率联合优化[J]. 信息通信技术与政策, 2023(10): 16-22.  
LIU J Z, GE X H, ZHENG Y L, et al. Joint optimization on spatial reuse and rate in FTTR scenarios[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2023(10): 16-22.
- [19] NUNEZ D, SMITH M, BELLALTA B. Multi-AP coordinated spatial reuse for Wi-Fi 8: group creation and scheduling[C]//Proceedings of the 2023 21st Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). Piscataway: IEEE Press, 2023: 203-208.
- [20] IIZUKA K, HASHIDA H, KAWAMOTO Y, et al. Performance evaluation of coordination function selection in multi-AP coordination for next-generation wireless LANs[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [21] ZHU D Q, WANG L D, PAN G M, et al. Two enhanced schemes for coordinated spatial reuse in IEEE 802.11be: Adaptive and distributed approaches[J]. Computer Networks, 2025, 258: 111060.
- [22] KIHARA Y, YAMAMOTO K, TAYA A, et al. Interference-free AP identification and shared information reduction for tabular Q-learning-based WLAN coordinated spatial reuse[J]. IEICE Communications Express, 2022, 11(7): 392-397.
- [23] 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.
- [24] DOUIK A, DAHROUJ H, AL-NAFFOURI T Y, et al. Coordinated scheduling and power control in cloud-radio access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2523-2536.
- [25] DAHROUJ H, YU W, TANG T W, et al. Power spectrum optimization for interference mitigation via iterative function evaluation[C]//Proceedings of the 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2011: 162-166.
- [26] QIAN L P, ZHANG Y J, HUANG J W. MAPEL: achieving global optimality for a non-convex wireless power control problem[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1553-1563.
- [27] ÖSTERGÅRD P R J. A fast algorithm for the maximum clique problem[J]. Discrete Applied Mathematics, 2002, 120(1/2/3): 197-207.
- [28] JIANG H, LI C M, MANYÁ F. An exact algorithm for the maximum weight clique problem in large graphs[C]//Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence. New York: ACM Press, 2017: 830-838.
- [29] 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.

## [作者简介]



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。



徐鹏举 (2001-), 男, 湖北天门人, 华中科技大学硕士生, 主要研究方向为短距通信优化与开发等。



刘奕晨 (1999-), 男, 河南周口人, 华中科技大学博士生, 主要研究方向为 5G/6G 和人工智能赋能无线通信。



刘应状 (1964-), 男, 湖北咸丰人, 博士, 华中科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信, 涵盖 LTE-Advanced、5G/6G 以及 WLAN 系统。