

# 一种基于 AP 协作的多小区多用户 全双工 MAC 协议

彭美平, 李波, 闫中江, 杨懋

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**针对下一代无线局域网(wireless local access network, WLAN)多小区高密度部署重叠覆盖场景中,冲突加剧所导致的缓存信息收集效率低、系统吞吐量急剧下降的问题,提出一种基于接入点协作的多小区多用户全双工多址接入协议(access point cooperation based multi basic service set multi-user full duplex multiple access protocol, CMMFD)。设计了一种面向重叠覆盖区域站点(station, STA)的信道资源分配算法,该算法中接入控制(access control, AC)设备根据重叠覆盖区域中 STA 个数的占比,为所有 STA 分配回复缓存和干扰信息(buffer state and interference information, BI)时所使用的信道资源;设计了一种基于接入点(access point, AP)协同发送触发帧收集所有 STA BI 信息的协议流程,STA 在收到触发帧之后,根据 AC 分配的信道资源以概率  $P$  接入信道回复并汇报 BI 信息;设计了一种基于全双工的多小区多用户信道资源分配算法,AC 根据所有 AP 上报的 BI 信息,分配信道资源并调度多小区中 STA 在子信道上进行多用户全双工传输。仿真结果表明:在多小区重叠覆盖场景下,相比 Mu-FuPlex 协议,EnFD-OMAX 协议,CMMFD 协议的系统吞吐量提升了 29.6%。

**关键词:**下一代无线局域网;媒体接入控制协议;正交频分多址接入;全双工;多 AP 协作  
**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-2758(2021)03-0502-08

随着移动智能终端的全面普及和物联网(internet of things, IoT)的快速发展。提升高密度部署场景下的网络系统性能将是未来无线网络面临的主要挑战。当前,无线局域网(wireless local area network, WLAN)作为无线数据业务的主要承载方式,以其传输速率高、部署灵活以及低成本等特性,近年来得到了快速的发展。思科公司提供的分析报告指出:自 2016 年至 2021 年,全球无线流量将以 47% 的复合年增长率急剧增长,其中 WLAN 所承载的数据流量占比从 2015 年的 42% 增加至 2021 年的 49%<sup>[1]</sup>。然而,最近发布的 IEEE 802.11ax 技术关注于高密度部署场景的网络性能和用户体验,无法满足下一代 WLAN 的极高吞吐量和低延时需求。为此,IEEE 标准委员会在 2019 年 5 月正式成立了

IEEE 802.11be 工作组<sup>[2]</sup>,其技术目标为实现极高吞吐量传输。目的为更好地支持虚拟现实、增强现实、4k/8k 超高清视频、远程办公和与云计算应用场景<sup>[3]</sup>。

为实现极高吞吐量传输的技术目标,多接入点(access point, AP)协作,多频带接入技术被 IEEE 802.11be 所采纳<sup>[4]</sup>。IEEE 802.11ax 引入了基于基本服务集(basic service set, BSS)着色技术的多 BSS 空间复用以提升系统吞吐量,但如果没有有效地干扰管理控制算法,空间复用并不能体现其优势,反而严重影响系统性能。因此,下一代 WLAN IEEE 802.11be 提出了几种 AP 协作方式<sup>[5-6]</sup>:正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)协作、空口协作、分布式多输入多输出

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金(61771392, 61771390, 61871322, 61501373)和航空科学基金(201955053002, 20185553035)资助

作者简介:彭美平(1984—),西北工业大学博士研究生,主要从事下一代 WLAN 全双工多址接入协议研究。

通信作者:闫中江(1983—),西北工业大学副教授,主要从事无线网络组网协议设计研究。e-mail:zhjyan@nwpu.edu.cn

(multi input multi output, MIMO) 协作,以提升空间复用效率。杨懋等人<sup>[6]</sup>首次提出了一种面向下一代 WLAN 的基于 AP 协作、多频带接入的全双工 MAC 协议框架,且具有很高的可伸缩性和良好的兼容性。

带内全双工(in-band full duplex, IBFD)技术作为下一代无线通信关键技术<sup>[7]</sup>,实现同时同频数据传输,其理论上可提升一倍的频谱效率。近年来,随着集成电路的快速发展,证明了使用主/被动隔离器可以很好的解决单天线全双工数据收发<sup>[8]</sup>。然而,传统的媒体接入控制(media access control, MAC)协议已不能满足全双工传输的需求,设计一种高效的全双工 MAC 协议已被业界相关研究人员广泛关注。

目前,已有的全双工 MAC 协议研究都局限于单小区网络场景<sup>[9-15]</sup>。文献[9]提出一种非对称全双工 AFD-MAC 协议,在传统分布式 MAC 协议基础上,引入全双工忙音(full duplex-busy tone, FBT)帧和 FD-RTS 帧建立全双工链路对。一种连续全双工链路配置(successive full-duplex link setup, SFLS)协议<sup>[10]</sup>被提出, SFLS 协议改进传统的 RTS/CTS 工作机制,提出一种在 ACK 帧携带 BSI 信息的方案,降低建立全双工链路的竞争开销。Liu 等人<sup>[11]</sup>首先分析了无线局域网中隐藏终端对饱和吞吐量的影响,并提出了一种基于隐藏终端的增强载波感知的全双工 MAC 协议。

上述全双工 MAC 基于传统单用户 MAC 协议设计,无法满足下一代 WLAN 多用户应用场景。因此, Mu-FuPlex 协议<sup>[12]</sup>首次提出了一种基于 OFDMA 的全双工 MAC 协议,由 AP 发送 trigger 帧调度站点(station, STA)进行数据传输。并在此基础上,为提升全双工链路对的成功概率,设计了 PcMu-FuPlex 协议<sup>[13]</sup>。EnFD-OMAX 协议<sup>[14]</sup>提出了一种面向下一代 WLAN 的新型免触发多用户全双工 MAC 协议,该协议由 STA 发起并竞争接入信道建立全双工传输链路对。为解决下一代高密度部署场景, STA 竞争冲突严重等问题, GFDO 协议<sup>[15]</sup>设计了一种基于空间簇的 OFDMA 多用户全双工 MAC 协议,该协议首次提出了两级 BSR 信息上报机制,第一级空间簇成员以低功率模型独立同步上报 BSR 信息至簇头 STA。第二级簇头 STA 将本轮收集的 BSR 信息以及簇头 STA 间的干扰信息上报至 AP。最终 AP 依据收集的信息集中调度上/下行空间簇成员建立多用户全双工链路传输对。

然而,下一代 WLAN IEEE 802.11be 技术的关注点从单 AP 场景转向多 AP 场景。因此,已有的多用户全双工 MAC 协议已不能满足下一代 WLAN 多 AP 重叠覆盖场景的传输需求。为此,本文提出一种基于 AP 协作的多小区多用户全双工 MAC 协议。该协议将协作组内的 STA 划分为重叠空间组和非重叠空间组。由接入控制(access control, AC)设备集中调度协作组内 STA 上报 BI 信息和全双工数据传输。

本文的主要贡献概况如下:

1) 提出了一种基于 AP 协作的多小区多用户全双工多址接入协议(AP cooperation based multi-BSS multi-user full duplex multiple access protocol, CMMFD)。CMMFD 协议由 AC 集中控制缓存和干扰(buffer state and interference information, BI)信息收集,并调度协作组内 AP 同时在不同子信道上建立全双工链路对。

2) 提出一种协作组内 BI 信息收集的信道资源分配算法,降低重叠区域内 STA 带来的竞争干扰,提高 BI 信息的搜集效率;同时提出一种级联全双工链路调度算法。

3) 搭建 NS-2 仿真平台,仿真验证了 CMMFD 协议与 Mu-FuPlex 协议、EnFD-OMAX 协议的网络性能,验证了 CMMFD 协议在平均接入信道的节点个数方面有了极大的提升,其系统吞吐量相应提升了 29.6%。

## 1 系统模型

CMMFD 协议考虑面向下一代 WLAN 的多小区协作网络场景,如图 1 所示。

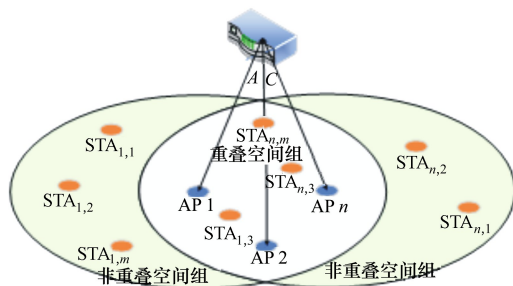


图1 多小区重叠覆盖场景

多个相互重叠的小区形成一个协作传输组。图 1 中的 AP1、AP2 以及 APn 形成一个协作组。协作

组内的所有 AP 通过有线方式与 AC 建立连接,文献 [16]提出了通过扩展现有的 AP 与 AC 之间的通信协议,充分考虑了系统中存在的处理延时和交互延时,并在实际的硬件平台证明其延时足够小,并不会产生任何显著的中断情况,为本文提出的 CMMFD 协议提供有效的实施基础。假设 1 个 AC 协作管理  $n$  个重叠覆盖的小区。每个小区包含 1 个具有全双工能力的 AP 和  $m$  个半双工 STA。假设系统带宽资源可划分为  $k$  个资源块(resource unit, RU)。

协作组内的 AP 一旦部署后,AC 可依据 STA 的地理位置信息<sup>[17]</sup>或 STA 是否可检测到 2 个或 2 个以上 AP 发出的信号<sup>[18]</sup>等技术将 STA 进行分组,位于重叠空间组的 STA 将其标记为 1,位于非重叠空间组的 STA 将其标记为 0。图 1 中灰色区域为重叠空间组,浅绿色区域为非重叠空间组。从图 1 中看出,协作组内非重叠空间组内的 STA 对与之不关联的 AP 不产生干扰,即非重叠空间组内的 STA 可以在相同的 RU 资源上收集 BI 信息和数据传输,从而提升系统的接入效率。

CMMFD 协议由 AC 集中控制协作组内的多个小区,并为其分配信道资源,AC 通过与协作组内的 AP 交互信息,可统计全局 STA 的状态信息。假设 AC 统计位于重叠空间组的 STA 个数为  $S_{org}$ ,协作组内所有 STA 的个数为  $S_{all}$ ,则可计算出位于重叠空间组内 STA 的占比值: $\delta = \frac{S_{org}}{S_{all}}$ 。从而可推导出重叠空间组所需的 RU 资源: $r = \delta \cdot k$ 。最终,AC 通过公式 (1) 确保重叠空间组和非重叠空间组都能分配到 RU 资源。

$$R_{org} = \begin{cases} \lfloor r \rfloor & \text{if } r \in (0, 1] \\ \lceil r \rceil & \text{if } r \in (k - 1, k] \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $k$  为网络系统中最大可用 RU 资源块个数。公式(1) 推导出重叠空间组所占用的 RU 资源数。从而可计算出非重叠空间组的 RU 资源数: $k - R_{org}$ 。在得到重叠空间组和非重叠空间组所需的 RU 资源数后,则可为其分配 RU 资源,优化 RU 资源分配在多协作组场景尤为重要。本文重点研究单个协作组网络场景,给出一个简单的 RU 资源分配方法以供参考:重叠空间组信道资源可按(2)式分配信道资源。则非重叠空间组信道资源可按(3)式分配信道资源。

$$\begin{cases} [0, R_{org} - 1) & \text{if } R_{org} \geq 1 \\ \phi & \text{if } R_{org} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} [R_{org}, k) & \text{if } R_{org} < k \\ \phi & \text{if } R_{org} = k \end{cases} \quad (3)$$

## 2 协议描述

### 2.1 基本思想

CMMFD 协议框架如图 2 所示。其包含 2 个阶段:BI 信息收集阶段、级联全双工数据传输阶段。首先,AC 将协作区域内的 STA 划分为重叠空间组 STA 和非重叠空间组 STA。并为其分配相应的信道资源。其次,AC 集中调度协作组内的 AP 同时在不同的 RU 资源块上发送携带资源分配信息的 E-RTS 帧触发本小区内的 STA 上报 BI 信息。第三,STA 在接收到 E-RTS 帧后,在已分配的信道资源上随机选择 1 个 RU 以概率  $P$  接入信道上报 BI 信息,没有竞争信道的 STA 记录邻近 STA 的干扰信息。最终,AC 依据本轮协作组内所有 AP 收集的 BI 信息级联调度多小区多用户全双工数据传输。

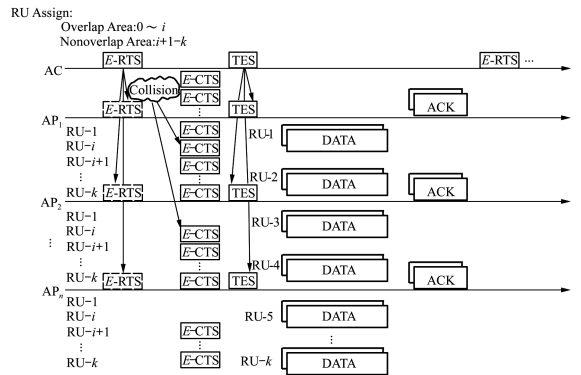


图 2 多小区多用户全双工 MAC 协议框架

CMMFD 协议与 IEEE 802.11ax 中的信道接入方法一致,协作组内 AP 采用传统二进制退避机制检测信道忙闲,当任一 AP 退避完成,将信息上报给 AC,由 AC 为协作组内所有 AP 分配 RU 资源,统一在已分配的 RU 资源上发送 E-RTS 帧。其次,协作组内所有 AP 在 BI 信息收集完成后并上报给 AC,AC 依据收集到的 BI 信息统一调度多小区协作全双工数据传输。为增强协作组内 AP 的处理速度,系统中的 AP 可采用轻量级虚拟 AP 设备<sup>[16]</sup>。

### 2.2 BI 信息收集

STA 上行 BI 信息收集效率,即 STA 上行缓存信息和节点间干扰信息是形成全双工传输链路对的关键。高效的缓存信息收集提升全双工链路对的传输

机会,实时的节点间干扰信息是全双工链路对成功传输的关键。CMMFD 协议充分考虑上行 BI 信息的收集。首先,AC 为协作组内 AP 分配不同的 RU 资源同步发送携带信道资源分配信息的增强型 E-RTS 帧触发各小区中 STA 上报 BI 信息。STA 在收到本小区发送的 E-RTS 帧后,有上行需求的 STA 以概率  $P$  接入信道,没有上行需求或没获得传输机会的 STA 处于接收状态,监听邻居 STA 发送 E-CTS 帧的信号,并记录该信号强度。准备接入信道的 STA 属于重叠空间组,则在 AC 已分配的重叠空间组 RU 资源集合中随机选择 1 个 RU 接入信道。而属于非重叠空间组的 STA 在 AC 已分配的非重叠空间组 RU 资源集合中随机选择 1 个 RU 接入信道。获得接入信道机会的 STA 在已选择的 RU 上回复携带缓存信息和节点间干扰信息的增强型 E-CTS 帧。其接入算法如算法 1 所示。

#### 算法 1 BI 信息收集算法

输入:概率阈值  $P_{th}$ ,STA 是否位于重叠区域  $B_{ov}$

非重叠空间组 RU 资源集合  $\Sigma_{nosg}$ ,重叠空间组 RU 资源集合  $\Sigma_{osg}$

输出: $R_{in}$

```

1:初始化:
2:    $P = \text{Random}[0,1]$ 
3: IF  $P_{th} > 1 - P$  THEN
4:   IF 数据队列非空 THEN
5:     IF  $B_{ov}$  为真
6:       返回  $R_{in} = \text{Random}(\Sigma_{osg})$ 
7:     ELSE
8:       返回  $R_{in} = \text{Random}(\Sigma_{nosg})$ 
9:   ELSE
10:    返回  $R_{in} = 1$  // 数据队列为空,放弃竞争
11: ENDIF
12:  返回  $R_{in} = -2$  // 放弃本次竞争机会

```

AC 维护 1 张实时缓存信息表和 1 张历史节点间干扰强度信息表。分别记为  $B_{ac}$  和  $I_{ac}$ ,如(4)式、(5)式所示。AP 在本轮 BI 信息收集完成后将收集到的 BI 信息转发给 AC。AC 在收到 AP 转发的 BI 信息后,动态更新 STA 节点间干扰信息表。

$$B_{ac} = \left\{ \begin{array}{l} (STA_{1,1}, STA_{1,2}, \dots, STA_{1,h}) \\ (STA_{2,1}, STA_{2,2}, \dots, STA_{2,k}) \\ \vdots \\ (STA_{n,1}, STA_{n,2}, \dots, STA_{n,l}) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$I_{ac} = \left\{ \begin{array}{l} (STA_{1,1}, STA_{1,2}), \dots, (STA_{1,1}, STA_{1,m}), (STA_{1,2}, STA_{1,1}), \dots, (STA_{1,2}, STA_{1,m}), (STA_{1,m}, STA_{1,1}), \dots, (STA_{1,m}, STA_{1,m-1}) \\ (STA_{2,1}, STA_{2,2}), \dots, (STA_{2,1}, STA_{2,m}), (STA_{2,2}, STA_{2,1}), \dots, (STA_{2,2}, STA_{2,m}), (STA_{2,m}, STA_{2,1}), \dots, (STA_{2,m}, STA_{2,m-1}) \\ \vdots \\ (STA_{n,1}, STA_{n,2}), \dots, (STA_{n,1}, STA_{n,m}), (STA_{n,2}, STA_{n,1}), \dots, (STA_{n,2}, STA_{n,m}), (STA_{n,m}, STA_{n,1}), \dots, (STA_{n,m}, STA_{n,m-1}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中: $n$  表示协作组内小区编号; $h$  表示编号为 1 的小区内 STA 编号; $k$  表示编号为 2 的小区内 STA 编号; $l$  表示编号为  $n$  的小区内 STA 编号。如: $STA_{n,1}$  表示第  $n$  个小区内编号为 1 的 STA。 $I_{ac}$  为 AC 维护的节点间干扰强度信息表,协作组内的 AP 将每轮 BI 收集过程中收集到的信息上报给 AC。其中, $(STA_{1,1}, STA_{1,2})$  表示编号为 1 的小区内编号为 2 的 STA 与编号为 1 的 STA 之间的信号强度。AC 统计协作组内所有 STA 之间的信号强度信息形成一个节点间干扰强度信息集合。

#### 算法 2 级联全双工链路调度算法

输入: $R_{sin}$  阈值  $S_{th}$ ,系统中 RU 个数  $k$ ,上行传输需求集合  $B_{ac}$ ,下行传输需求集合  $D_{ac}$ ,节点间干扰强度信息集合  $I_{ac}$

输出:全双工链路集合  $\{F_{index}, [S_{i,h,ul}, S_{i,l,dl}, R_{index}]\}$ ,其中,

$\forall S_{i,h,ul}, S_{i,l,dl} \in C_i, h \neq l$ ,且  $C_i$  表示第  $i$  个小区。 $R_{index}$  为 PU 编号, $R_{index} \in [0, k]$ , $F_{index}$  表示级联全双工数据传输编号。

```

1:初始化:
2:    $R_{index} = 0$ 
3:    $F_{index} = 1$ 
4:   将  $B_{ac}, D_{ac}, I_{ac}$  按小区进行分组,并统计每个小区  $C_i$  中的上行 STA 和下行 STA 个数,分别记为  $C_{i,ul}, C_{i,dl}$ 。
5: FOR  $C_i, i = 1, 2, \dots, n$ 
6:   遍历  $C_i$  集合中的上行 STA
7:   FOR  $S_{ul,h}, h = 0, 1, \dots, C_{i,ul}$ 
8:     遍历  $C_i$  集合中下行 STA
9:   FOR  $S_{dl,l}, l = 0, 1, \dots, C_{i,dl}$ 
10:    遍历  $I_{ac}$  集合中 STA 编号为  $h$  和  $l$  之间的节点间干扰强度  $S_{h,l}$ 
11:    IF  $S_{h,l} > S_{th}$  THEN

```

```

10:      IF  $R_{index} \geq k$ 
11:           $F_{index}++$ 
12:           $R_{index} = 0$ 
13:          返回  $\{F_{index}, [S_{i,h,ul}, S_{i,l,dl}, R_{index}]\}$ 
14:      ELSE
15:           $R_{index}++$ 
16:          返回  $\{F_{index}, [S_{i,h,ul}, S_{i,l,dl}, R_{index}]\}$ 
17:      ENDIF
18:  ENDFOR
19: ENDFOR

```

### 2.3 级联全双工数据传输

CMMFD 协议在 BI 信息收集阶段完成之后由 AC 统一调度全双工数据传输。首先,协作组内所有 AP 完成本小区中的 BI 信息收集,在收集完成后转发给 AC。其次,AC 获取到协作组内本次收集的 BSR 信息和协作组内所有 STA 之间的节点间干扰强度信息。最终,AP 依据收集到的 BSR 信息和历史节点间干扰强度信息调度全双工链路传输。其调度算法如算法 2 所示。

AC 在建立全双工链路对时,首先,AC 将上行需求集合  $B_{ac}$ ,下行需求集合  $D_{ac}$ ,以及历史节点间干扰强度信息集合  $I_{ac}$ ,按不同小区场景进行分组。其次,以上行需求集合为基准,依次在小区内建立全双工链路对,由于 CMMFD 协议非重叠空间组可使用相同 RU 进行 BI 收集,则一次收集过程中收集到 STA 的 BI 信息可能大于系统中最大 RU 资源,则 CMMFD 协议在数据传输阶段采用级联全双工数据传输,即协作组内 AP 连续发送 TFS 帧多次调度数据传输。

## 3 仿真与实验

### 3.1 仿真场景及参数设置

为验证 CMMFD 协议的系统性能,搭建了基于 NS2 的链路级-系统级一体化仿真平台。仿真场景中配置多个重叠覆盖的小区,每个小区的覆盖面积  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。图 3 描述了当协作组内 AP 个数为 4,单个小区内 STA 个数为 40 时的仿真场景配置图。STA 在与之关联的 AP 覆盖范围内随机分布,且每个小区中的 STA 个数从 5 个开始,依次以 5 为递,最大单个小区中 STA 个数为 40。仿真时间设置为 20 s,最终仿真结果为 10 次独立重复仿真的平均值。信道带宽设置为 20 MHz, RU 个数设置为 9。

其中概率  $P$  设置为 0.8 和 0.2<sup>[15]</sup>。其他参数设置如表 1 所示。

表 1 网络参数配置

参数	参数值
前导码长度/ $\mu\text{s}$	20
控制帧物理层速率/ $(\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1})$	6
数据帧物理层速率/ $(\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1})$	54
MAC 分组头长度	28
概率 $P$	0.8
$S_{th}/\text{dB}$	3.16
DIFS 长度/ $\mu\text{s}$	34
SIFS 长度/ $\mu\text{s}$	16
时隙长度/ $\mu\text{s}$	9
TXOP 长度/s	0.003
信道带宽/MHz	20

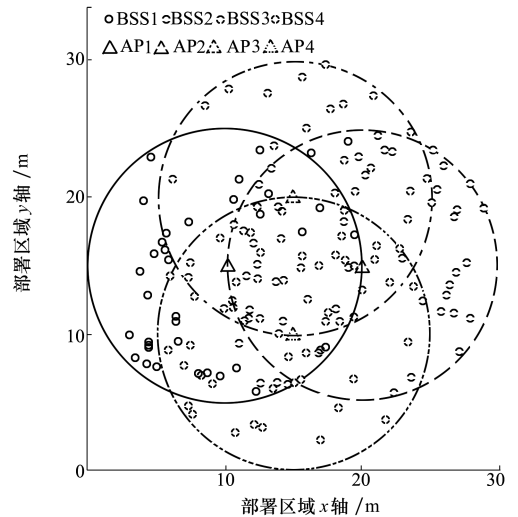


图 3 NS2 仿真场景配置图

### 3.2 系统平均接入信道数分析

上行 BI 收集效率直接影响全双工传输对的建立。而上行 BI 收集即为单位时间内 STA 平均接入信道的个数。从图 4a) 至 4c) 可以看出,EnFD-OMAX 协议与 Mu-FuPlex 协议采用 OFDMA 接入方式,在小区中 STA 规模达到一定程度时,平均接入信道的 STA 个数趋向平衡<sup>[21]</sup>。EnFD-OMAX 协议在同一时刻同时竞争接入信道的 STA 个数大于 Mu-FuPlex 协议,导致成功接入的 STA 个数约小于 Mu-FuPlex 协议。而 CMMFD 协议将协作组内 STA 分割成重叠区域和非重叠区域的 STA,由 AC 统一为其分配信道资源,且非重叠区域 STA 可以使用相同信道资源上报 BSR 信息。因此,重叠区域 STA 对非重叠区域 STA 不产生干扰。使得平均接入信道个数

远大于 Mu-FuPlex 协议和 EnFD-OMAX 协议。然而, CMMFD 协议采用  $P$  概率接入方式, 随着 STA 规

模的扩大, 同时竞争信道的 STA 个数增加, 导致在概率  $P$  值高的情况下, 平均接入信道个数降低。

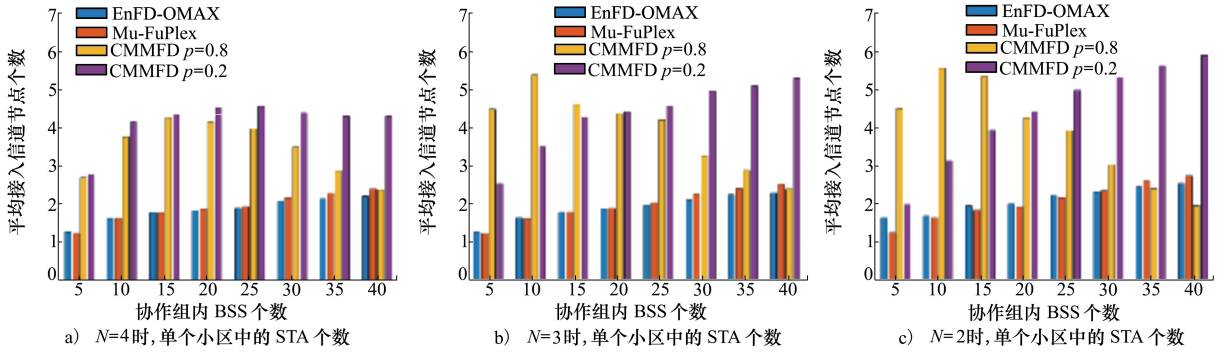


图 4 平均接入信道个数与协作组内网络规模的关系

### 3.3 系统吞吐量分析

系统吞吐量是评价 MAC 协议设计的重要性能指标。本文提出的 CMMFD 协议, 从吞吐量角度来说可理解为纯调度吞吐量分析。依据 2.2, 2.3 小节可知, 一次传输的时间总长度可分为 BI 信息收集时间和全双工数据传输时间, 如图 5 所示。其中 BI 信息收集时间长度为:  $T_{bi} = T_{e-rts} + T_{e-cts} + 2 \cdot T_{sifs} + T_{difs}$ , 全双工数据传输时间长度为  $T_d$ 。则 CMMFD 协议的系统吞吐量可用公式(6)表示。

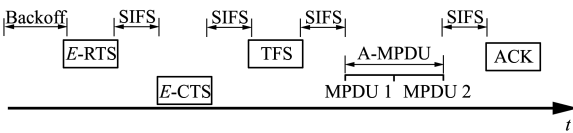


图 5 CMMFD 协议传输机制

$$E_{th} = \frac{L_{U,payload} + L_{D,payload}}{T_{bi} + T_d} \quad (6)$$

式中:  $L_{U,payload}$  表示上行传输的有效载荷;  $L_{D,payload}$  表示下行传输的有效载荷。

为评估 CMMFD 协议的系统性能, 分别对协作组内布置 2, 3, 4 个小区的网络场景进行仿真, 如图 6a) 至 6c) 所示, 且单个小区网络场景中的 STA 从 5 到 40 个进行了对比仿真。从图 6 可以看出, 本文所提的 CMMFD 协议在多小区重叠覆盖场景中其系统吞吐量远大于 EnFD-OMAX 协议和 Mu-FuPlex 协议。CMMFD 协议的系统吞吐量增益来源于 2 个方面: ①CMMFD 协议通过对重叠空间组和非重叠空间组进行资源分配, 协作组内 STA 合理使用有限的频谱资源, 降低选择相同 RU 接入信道的竞争冲突, 极大地提升了 BI 收集效率; ②由于 AC 具备协作组内全局 STA 之间的节点间干扰强度信息及单小区内重叠与非重叠区域的 STA 信息, 为成功建立全双工传输链路对提供了可靠的信息依据。因此, 尽管在大规模部署 STA 的网络场景中, 在概率  $p$  值较大时平均接入信道的 STA 个数约小于 EnFD-OMAX 协议和 Mu-FuPlex 协议, 但在系统吞吐量上 CMMFD 协议仍然优于其他协议。从图 6a) 至 6c) 可以看出, 针对协作组内小区的个数, EnFD-OMAX 协议由于

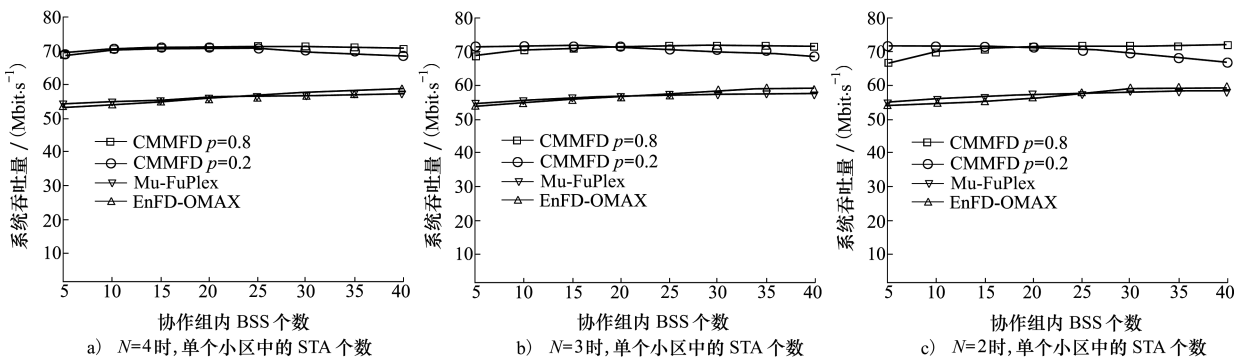


图 6 系统吞吐量与协作组内网络规模的关系

采用 STA 发起建立的全双工传输链路对,在单小区 STA 规模不断增加,其系统性能劣于 Mu-FuPlex 协议。因为 Mu-FuPlex 协议采用 AP 触发发起 BI 信息收集,且协作组内的 AP 相互覆盖,同一时间只存在一个小区进行信息交互。因此,在单小区 STA 规模达到一定规模时,Mu-FuPlex 协议在多小区重叠覆盖场景中要优于 EnFD-OMAX 协议。EnFD-OMAX 协议有 STA 发起建立全双工传输链路对,任何时刻协作组内所有 STA 参与竞争,导致多小区重叠覆盖场景中竞争冲突加剧,系统吞吐量降低。

## 4 结 论

针对下一代 WLAN 的高密集部署网络,

IEEE802.11be 技术的关注的从单 AP 向多 AP 场景的转换以及极高吞吐量传输的技术目标。本文充分挖掘 IEEE802.11be 中多 AP 协作关键技术,提出一种基于 AP 协作的多小区多用户全双工 MAC 协议。通过协作组内的多 AP 协作,将协作组内的 STA 进行分组,统一分配信道资源,降低重叠区域内 STA 竞争冲突,以及非重叠区域内 STA 的信道资源复用,极大地提升了系统的 BI 信息收集效率,全双工链路对的成功传输概率,从而提升系统吞吐量。仿真结果表明,CMMFD 协议与 Mu-FuPlex 协议和 EnFD-OMAX 协议相比,系统吞吐量提升了 29.6%。后续研究将对重叠区域与非重叠区域进行更细的分组以及协作组内 AP 的位置部署进行优化,从而进一步系统吞吐量。

## 参考文献:

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017-2022[EB/OL]. (2020-03-09)[2020-02-02]. <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>.
- [2] IEEE 802.11be Task Group. Part 11: wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications amendment: enhancements for extremely high throughput(EHT)[EB/OL]. (2019-01-18)[2020-02-02]. [https://www.ieee802.org/11/PARs/P802\\_11be\\_PAR\\_Detail.pdf](https://www.ieee802.org/11/PARs/P802_11be_PAR_Detail.pdf).
- [3] LOPEZ Perez D, GARCIA Rodriguez A. IEEE 802.11be extremely high throughput: the next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax[J]. IEEE Commun Mag, 2019, 57: 113-119
- [4] DENG C, FANG X, HAN X, et al. IEEE 802.11be-Wi-Fi 7: new challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2136-2166
- [5] IEEE802.11. HEW MAC efficiency analysis for HEW SG[EB/OL]. (2020-02-03)[2020-02-03]. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0107-01-00be-multi-ap-coordination-for-spatial-reuse.pptx>
- [6] YANG M, LI B, YAN Z, et al. AP coordination and full-duplex enabled multi-band operation for the next generation WLAN; IEEE 802.11be (EHT)[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Xi'an, China, 2019: 1-7
- [7] IEEE802.11. HEW MAC Efficiency Analysis for HEW SG[EB/OL]. (2018-09-11)[2020-02-03]. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1225-00-00fd-technical-report-on-full-duplex-for-802-11-fd-architecture.docx>
- [8] REISKARIMIAN N, DASTJERDI M B, ZHOU J, et al. Analysis and design of commutation-based circulator-receivers for integrated full-duplex wireless[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(8): 2190-2201
- [9] KIRAN R, MEHTA N B, THOMAS J. Design and network topology-specific renewal-theoretic analysis of a MAC protocol for asymmetric full-duplex WLANs[J]. IEEE Trans on Communications, 2019, 67(12): 8532-8544
- [10] AHN H, PARK Y D, KIM D, et al. A full-duplex MAC protocol based on buffer status report for successive full-duplex link setup[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(9): 1506-1509
- [11] LIU S, FU L, XIE W. Hidden-node problem in full-duplex enabled CSMA networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2020, 19(2): 347-361
- [12] QU Q, LI B, YANG M, et al. MU-FuPlex: a multiuser full-duplex MAC protocol for the next generation wireless networks[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), San Francisco, CA, 2017: 1-6
- [13] QU Q, LI B, YANG M, et al. Power control based multiuser full-duplex MAC protocol for the next generation wireless networks[J]. Mob Netw Appl, 2018, 23: 1008-1019

- [14] PENG M, LI B, YAN Z, et al. A trigger-free multi-user full duplex user-pairing optimizing MAC protocol[C]//5rd EAI International Conference on IOT as a Service, Xi'an, China, 2019: 598-610
- [15] PENG M, LI B, YAN Z, et al. A spatial group-based multi-user full-duplex OFDMA MAC protocol for the next-generation WLAN[J]. Sensors, 2020, 20(14): 3826
- [16] SALDANA J, RUIZ-MAX J, FERNÁNDEZ-NAVAJAS J, et al. Attention to Wi-Fi diversity: resource management in WLANs with heterogeneous APs[J]. IEEE Access, 2021, 9: 6961-6980
- [17] IVAN S, XU L. Loop-free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(10): 1023-1032
- [18] LI Y, LI B, YANG M, et al. Multiple BSSs association based spatial clustering group access protocol for next generation WLAN [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 809-815

## An multi-BSS multi-user full duplex MAC protocol based on AP cooperation for the next generation WLAN

PENG Meiping, LI Bo, YAN Zhongjiang, YANG Mao

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low efficiency of buffer information collection and sharp drop of system throughput caused by the aggravation of conflicts in the multi basic service set (BSS) high density deployment overlap coverage scenario of next generation wireless local access network (WLAN), an access point cooperation based multi-BSS multi-user full duplex multiple access protocol named as CMMFD is proposed. Firstly, a channel resource allocation algorithm for stations (STA) in overlapping coverage area is designed, in which, the access control (AC) equipment allocates the channel resources for all STA in response to buffer state and interference information (BI) according to the proportion of STA in the overlapped coverage area. Secondly, a BI information collection protocol process based on access point (AP) cooperation sending trigger frame is designed to collect all STA information. After receiving trigger frame, STA will access the channel and report BI information in p-probability according to the channel resources allocated by AC. Finally, a multi-BSS multi-user channel resource allocation algorithm based on full duplex is designed. AC allocates channel resources according to all BI information reported by AP, and schedules STA in the multi-BSS to carry out multi-user full duplex transmission over the sub-channel. Simulation results show that the throughput of the CMMFD protocol improves by 29.6%, compared with Mu-FuPlex protocol and EnFD-OMAX protocol.

**Keywords:** the next generation WLAN; MAC; OFDMA; full duplex; AP cooperation

**引用格式:** 彭美平, 李波, 闫中江, 等. 一种基于 AP 协作的多小区多用户全双工 MAC 协议[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 502-509

PENG Meiping, LI Bo, YAN Zhongjiang, et al. An multi-BSS multi-user full duplex MAC protocol based on AP cooperation for the next generation WLAN[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 502-509 (in Chinese)