

基于改进遗传算法的多 AP 联合传输方案研究

刘曼, 方旭明

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756)

摘要: 为解决密集 Wi-Fi 网络中重叠基本服务集 (OBSS, overlapping basic service set) 用户受到严重的同频干扰, 导致接收信号信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 值低、数据传输速率低或者无法传输的问题, 提出了一种基于改进遗传算法 (IGA, improved genetic algorithm) 选择接入点 (AP, access point) 协作集的多 AP 联合传输 (JT, joint transmission) 方案。首先, 利用 SINR 阈值法将系统内所有站点 (STA, station) 分为中心用户和边缘用户, 边缘用户采用 JT 方案。然后, 以最大化边缘用户吞吐量为目标, 利用 IGA 为每个边缘用户确定合适的协作 AP 形成其专属的 AP 协作集, 最大化 JT 技术的潜在增益。仿真结果表明, 所提方案在密集 Wi-Fi 网络场景下能够有效减小基本服务集 (BSS, basic service set) 间的同频干扰, 提升 BSS 边缘用户的性能和吞吐量。

关键词: 密集 Wi-Fi 网络; BSS 边缘用户; 多 AP 协调; 联合传输; 改进遗传算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00346

Research on multi-AP joint transmission scheme based on improved genetic algorithm

LIU Man, FANG Xuming

School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: In order to solve the problem that overlapping basic service set (OBSS) users are subject to serious co-frequency interference in the dense Wi-Fi network, resulting in low signal to interference plus noise ratio (SINR) of received signals, low data transmission rate or inability to transmit, a multi-access point (AP) joint transmission (JT) scheme based on improved genetic algorithm (IGA) selection of AP coordination set was proposed. Firstly, the SINR threshold method was used to divide all station (STA) in the system into central users and edge users, and the JT scheme was adopted for edge users. Then, with the goal of maximizing the throughput of edge users, IGA was proposed to determine the appropriate coordinated AP for each edge user to form its own AP coordination set, and maximize the potential gain of JT technology. The simulation results show that the proposed scheme can effectively reduce the co-frequency interference between BSS and improve the performance and throughput of BSS edge users in dense network.

Key words: dense Wi-Fi network, BSS-edge user, multi-AP coordination, joint transmission, IGA

0 引言

Wi-Fi 终端设备数呈逐年递增的趋势, 尤其是近年来, 无线增强现实、虚拟现实和 4K/8K 视频等新兴数据密集型应用的出现, 未来的无线网络将

需要部署大量接入点 (AP, access point) 来应对这种不断增长的数据流量需求。AP 部署密集化使得用户尽可能地靠近网络节点, 从而有效地降低路径损耗对传输质量的影响, 提高平均信噪比。虽然 AP 密集化能够改善网络覆盖、提高用户接收信号

收稿日期: 2023-01-19; 修回日期: 2023-04-22

通信作者: 方旭明, xmfang@swjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071393)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62071393)

强度,但在有限的网络区域内部署大量 AP 会造成多 AP 间覆盖区域相互重叠,并且,在实际中为了获得较高的频谱资源利用率,部分相邻的 AP 不可避免地采用相同的频段,从而导致强烈的同频干扰,尤其是重叠基本服务集 (OBSS, overlapping basic service set) 用户能同时收到来自关联 AP 和相邻干扰 AP 的信号,有用信号和干扰信号强度相差不大,导致信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 低,数据传输速率低或者无法传输数据包,从而无法满足用户的数据传输需求,严重限制了用户的服务质量和系统整体性能的提升^[1]。因此,研究密集 Wi-Fi 网络中有效减轻基本服务集 (BSS, basic service set) 间干扰、提高 OBSS 用户的性能愈加重要。

目前在 IEEE 802.11 的工作模式下,密集 Wi-Fi 网络中 AP 之间缺乏协调,多 AP 场景下的竞争冲突和干扰变得更加严重和不可控。因此,下一代 Wi-Fi 标准提出多 AP 协调技术^[2],该技术通过多个 AP 之间共享信息、相互协作,最大化利用有限的时频及空口资源,更好地在多个 BSS 间协调干扰、优化全局资源分配、改善密集 Wi-Fi 网络中设备接入效率低、传输时延高等问题,实现多 AP 并行传输,提高数据传输的系统效率和性能。IEEE 802.11be 任务组提出并研究了 4 种多 AP 协调技术^[3-10],包括协调正交频分多址 (C-OFDMA, coordinated orthogonal frequency-division multiple access)、协调波束成形 (CBF, coordinated beam forming)、协调空间复用 (CSR, coordinated spatial reuse) 和联合传输 (JT, joint transmission)。本文重点关注 JT 技术的解决方案,以提高频谱利用率,降低 BSS 间干扰,保障 OBSS 用户的通信质量,提高网络容量和系统性能。

JT 又称为分布式多输入多输出 (D-MIMO, distributed multiple-input multiple-output),分布在不同地理位置的 AP 之间相互协作,共同为信道质量较差的用户发送/接收数据^[11-12]。为此,多个 AP 之间需要共享一些必要的信息,如调度信息、信道状态信息 (CSI, channel state information)、数据信息等^[13]。为实现联合下行 D-MIMO,采用文献[14]对多 AP 联合传输的假设条件和处理方式,OBSS 用户能够同时被多个 AP 服务,将相邻 AP 的干扰信号转化为有用信号并且更充分地利用系统资源,从而有效降低 BSS 间干扰;并且多 AP 协作发送的信号相互叠加,显著提升了 OBSS 用户接收信号的信干噪比,提高了系统整体吞吐量。

现有 Wi-Fi 网络中关于多 AP 协调传输的研究仍处于起步阶段。文献[15]研究了下一代 Wi-Fi 多 AP 场景下的并行传输技术,提出了适用于现有 IEEE 802.11ax 标准以及下一代 Wi-Fi 标准 (IEEE 802.11be) 的多 AP 下行波束成形配对传输方案,以及基于隐式探测的 JT 方案。针对多 AP 协调传输中多个 AP 之间的信息交换过程,文献[16]为该过程定义了新的控制帧和多 AP 协调的传输过程,并通过 NS-3 平台模拟评估了多 AP 协调的性能。为解决分布式信道接入效率低下以及上下行传输不公平的问题,在文献[17]中提出了一种与 IEEE 802.11 协议完全兼容的 C-OFDMA 方案,并使用马尔可夫链模型对所提方案的吞吐量进行了数学分析,仿真结果表明,所提方案能够有效增加 AP 的传输机会,比传统下行 OFDMA 传输吞吐量增益提高了 53%。文献[18]提出了一种分布式多天线的多 AP 系统,可以使用 CBF 同时为多个用户提供服务,并专注于解决相位同步、CSI 反馈和用户分组问题。文献[19]研究了 AP 协调技术在空间复用中的应用,提出了一种基于鲁棒性对抗强化学习的多 AP 协调方法以减少 AP 之间的冲突概率。文献[20]针对密集 Wi-Fi 网络环境下无序竞争、相邻 AP 干扰、接入效率降低和频率利用率低等问题,研究了多 AP 协调传输过程,主要设计了 C-OFDMA 频域资源分配和 CSR 功率控制两种多 AP 协调传输方案,在 NS3 仿真平台下模拟表明,提出方案能有效提升多 AP 系统的传输性能、获得较高的吞吐量增益。

在传输中采用多点协作的方式实现性能增益已经在蜂窝网中广泛使用^[21-22],但在 Wi-Fi 网络中,目前关于 JT 技术的研究较少。文献[14]介绍了下一代 Wi-Fi 标准提出的 JT 技术的挑战和可实现的增益,同时简要介绍了 AP 间不需要共享数据的 CSR 和 CBF 两种多 AP 协调传输方案,并将它们与 JT 进行对比。文献[23]研究了单天线和多天线系统的多 AP 联合传输方法及其对系统性能的影响,并提出一种最大化系统总吞吐量的决策问题,即多 AP 部署场景下,哪些站点 (STA, station) 使用多 AP 联合传输、哪些 STA 使用单 AP 传输以及哪些 STA 使用有干扰的单 AP 传输。为了最小化 CSI 反馈开销和最大化系统吞吐量,文献[24]建立了几个 D-MIMO 组,其中同组中的 AP 使用 D-MIMO,而不同组间的 AP 使用正交资源来避免干扰,并提出

了联合 AP 分组和用户关联算法。

尽管目前已有一些关于 Wi-Fi 网络下 JT 技术的设计方案,但这些方案主要集中在协议和验证性能增益上,本文主要研究如何构建最佳 AP 协作集以最大化 JT 的优势。因此,本文提出一种基于改进遗传算法 (IGA, improved genetic algorithm) 选择 AP 协作集的 JT 方案,通过为每个 BSS 边缘用户选择最优的 AP 协作集,然后 AP 协作集内 AP 间以协作的方式将干扰信号转化为有用信号,改善 OBSS 用户受到严重同频干扰的问题;同时,多个 AP 协作为 BSS 边缘用户提供服务,能获得更高的分集增益以及自由度增益,提高边缘用户的吞吐量和通信质量。

1 系统模型

本方案基于 IEEE 802.11be 协议的密集 Wi-Fi 网络场景,一个 BSS 由 AP 与其关联的多个 STA 构成。相邻 BSS 间有重叠,多个 AP 工作在同一频段。位于某个 BSS 边缘的 STA 可能同时处于多个 AP 的覆盖范围内,不仅接收来自其关联 AP 的下行数据,还受其他 AP 数据传输的干扰。密集 Wi-Fi 网络场景示意图如图 1 所示,以下行为例,其中实线表示关联 AP 的下行数据流,虚线表示其他 AP 下行数据产生的干扰。

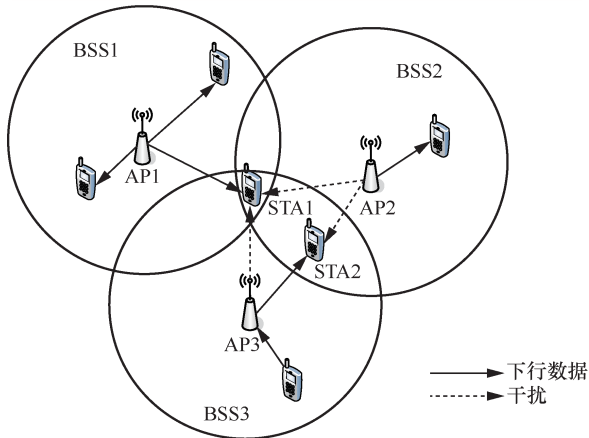


图 1 密集 Wi-Fi 网络场景示意图

考虑在一个多 AP 场景随机分布 M 个同频 AP 和 U 个 BSS 边缘用户,假设多个 AP 间存在一个有线或无线的高速回传二层协作通道,可用于交换传输数据和 CSI 等。用 AP_m 表示第 m 个 AP, $m=1,2,\dots,M$, 每个 AP 支持的天线数为 N_t ; 用 STA_u 表示第 u 个边缘 STA, $u=1,2,\dots,U$, 每个边缘 STA 支持的天线数为 N_r 。值得注意的是,在 JT 中必须

满足发送端的天线数之和大于或等于接收端的天线数之和。所提方案的目标是为每个边缘用户找到合适的 AP 协作集,AP 协作集中有一个主 AP 负责管理和控制其他从 AP,每个 AP 都能成为主 AP。此时多用户多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 的预编码器在 AP 协作集内所有 AP 的发射天线组成的组合阵列中使用。

假设 STA_u 的 AP 协作集由 L 个 AP 组成,考虑下行传输,该用户接收的信号为

$$y_u = \sum_{l=1}^L H_{u,l} W_{u,l} x_{u,l} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1, i \neq u}^U H_{u,l} W_{i,l} x_{i,l} + n_u \quad (1)$$

其中, $x_{u,l}$ 是第 l 个 AP 发送给第 u 个用户的数据, $H_{u,l} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 为第 l 个 AP 到第 u 个用户的信道矩阵, $W_{u,l} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ 表示 AP_l 给 STA_u 发送数据使用的预编码矩阵,因为假设主 AP 拥有 AP 协作集内的所有 AP 到各用户的准确 CSI,可以联合确定预编码矩阵。 n_u 为加性白高斯噪声且服从均值为零、方差为 σ_u^2 的高斯分布。为方便表述,将式(1)变形为

$$y_u = H_u W_u x_u + \sum_{i=1, i \neq u}^U H_u W_i x_i + n_u \quad (2)$$

其中, $H_u = [H_{u,1}, \dots, H_{u,L}] \in \mathbb{C}^{N_r \times LN_t}$ 为 AP 协作集中所有 AP 到 STA_u 的信道矩阵, $W_u = [W_{u,1}, \dots, W_{u,L}]$ 是 AP 协作集为 STA_u 设置的预编码矩阵, x_u 是 AP 协作集给 STA_u 发送的数据。式(2)等号右边第一项表示 STA_u 期望收到的信号,第二项为其他用户的干扰信号,第三项为噪声。

2 多 AP 联合传输方案流程

本方案基于 IEEE 802.11ax 标准与 IEEE 802.11be draft,通过定制化介质访问控制 (MAC, medium access control) 流程,设计了密集 Wi-Fi 网络场景下基于 IGA 选择 AP 协作集的 JT 方案。多 AP 联合传输方案流程如图 2 所示,分为系统初始化阶段、边缘用户判定阶段、多 AP 准备阶段和探测阶段、确定用户的 AP 协作集阶段、多 AP 联合传输阶段 5 个阶段。通过为每个边缘用户选择属于它自己的最佳的协作 AP 以形成 AP 协作集,通过分布式协作降低 BSS 间干扰,提高用户接收信号质量,提升系统性能和用户体验。

首先,系统内所有 AP 和 STA 开机后进入初始化阶段,此阶段 AP 和 STA 进行传统 Wi-Fi 标准规

定的相关操作, 如 AP 扫描信道、竞争信道发送 Beacon 等操作、STA 侦听 Beacon 帧、AP 和 STA 之间的认证关联等操作。

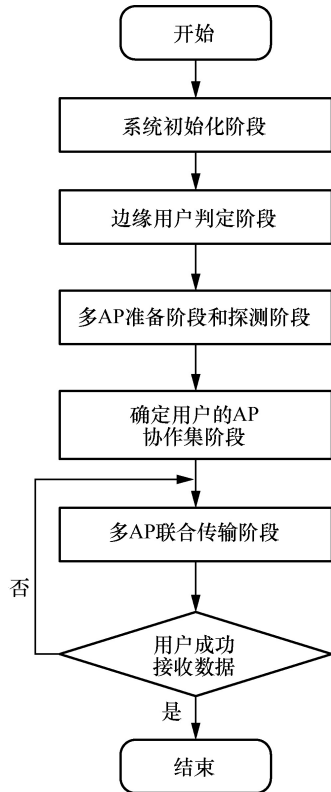


图2 多 AP 联合传输方案流程

密集 Wi-Fi 网络拓扑生成后, 进入边缘用户判定阶段, 该阶段 AP 将系统内所有 STA 进行区分, 分为中心用户和边缘用户。因为位于 BSS 中心的、远离干扰 AP、信道状况较好的中心用户不会受较强的 BSS 间干扰, 无须采用 JT 技术也能保证其通信质量。因此, 为了降低复杂度和开销、提高资源利用率, 仅为位于 BSS 边缘的、信道状况较差的边缘用户采用 JT 技术会更有效。本文采用 SINR 阈值法判定边缘用户和中心用户, 该方法如下。

根据经验值预先设定一个区分中心用户和边缘用户的 SINR 阈值 $SINR_{th}$, 初始化用户并将 STA 侦听到的多个 AP 的接收信号强度 (RSSI, received signal strength indicator) 上报, 根据式(3)计算所有用户的 SINR, 如果用户的 $SINR_u$ 大于或等于 $SINR_{th}$, 那么该用户为中心用户; 反之, 则为边缘用户。这种方法的关键是选择合适的 $SINR_{th}$, 此阈值与边缘用户的数量、系统的开销和性能有着密切的关系。

$$SINR_u = \frac{RSSI_{current-AP}}{RSSI_{other-AP} + N_0 B} \quad (3)$$

其中, $RSSI_{current-AP}$ 为用户 u 接收到关联 AP 的 RSSI, $RSSI_{other-AP}$ 为其他同频 AP 的 RSSI, N_0 为噪声功率谱密度, B 为系统带宽。

多 AP 准备阶段和探测阶段中, 首先在准备阶段, 不同 AP 之间可以通过增强的管理帧或新定义的 request 帧获取邻近 AP 的状态, 包括链路状态、负载状态、多 AP 能力、邻近 AP 的关联 STA 操作等信息^[25]。例如, 通过帧中携带的多 AP 能力指示信息, 可以确认一个 AP 是否具有进行多 AP 协作传输的能力, 具体帧结构和信令流程设计不在本文讨论范围。由此, 通过获取的状态信息确定哪些邻近 AP 具有参与多 AP 协作传输的条件, 成为备选 AP。然后, 多 AP 探测阶段中, 主 AP 触发各个从 AP 进行 sounding 探测, 主 AP 收集各个 AP 和 STA 之间的 CSI。

确定用户的 AP 协作集阶段中, 根据上一阶段获取的 CSI, 以最大化系统内边缘用户吞吐量为目标, 为每个边缘用户确定其专属的 AP 协作集, 对系统进行数学建模, 并通过启发式算法求解。

多 AP 联合传输阶段中, 根据上一阶段确定的 AP 协作集, AP 协作集内的 AP 共享用户数据和用户调度信息, 主 AP 向从 AP 发送 Trigger 帧触发 JT 过程, 采用基于块对角化 (BD, block diagonalization) 预编码技术的 MIMO 传输方式同时向用户发送下行数据。

此外, 假设 AP 部署的位置长时间不会发生变化, 并且大多数用户在一段较长的时间内处于静止状态, 边缘用户判定就不用多次执行, 若网络中存在 STA 的加入、退出情况, 则单独对加入的 STA 执行边缘用户判定。同时, 基于用户和流量需求的空时分布动态改变, 多 AP 准备阶段和探测阶段、确定用户的 AP 协作集阶段需要多次执行。

3 基于改进遗传算法选择 AP 协作集

不同的 AP 与用户之间的信道条件不同, 不同的 AP 协作集对同一用户产生的增益也不同, 为边缘用户选择合适的 AP 协作集是最大化 JT 技术优势的关键。

1) 系统建模

执行 JT 前, 需要为 U 个边缘 STA 选择参与协作传输的 AP, 共有 M 个备选 AP, 所有备选 AP 都

具有多 AP 协调传输能力。定义 $\mathbf{a}_u = \{a_{u,1}, a_{u,2}, \dots, a_{u,M}\}$ 为 STA_u 的传输状态矩阵, 其中 $a_{u,m} \in \{0,1\}$, $a_{u,m} = 0$ 表示第 m 个 AP 不为第 u 个边缘 STA 服务, 反之则表示第 m 个 AP 为第 u 个边缘 STA 服务。 $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_U\}$ 表示所有边缘用户与 AP 之间的传输状态矩阵, \mathbf{A} 的阶数为 $U \times M$ 。考虑下行传输, 第 u 个边缘用户收到的信号将式(2)改写可得

$$\mathbf{y}_u = \mathbf{H}_u \mathbf{W}_u \mathbf{a}_u \mathbf{x}_u + \sum_{i=1, i \neq u}^U \mathbf{H}_u \mathbf{W}_i \mathbf{a}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_u \quad (4)$$

传输状态矩阵 \mathbf{A} 决定了某个 AP 是否为边缘用户 u 的传输节点。换句话说, 确定边缘用户 u 的 AP 协作集就等价于找到传输状态矩阵的第 u 行中所有为 1 的元素。为每个边缘用户选择合适的 AP 协作集, 以最大化系统内边缘用户吞吐量为目标, 建立的数学模型为

$$\text{P1: } \max \sum_{u=1}^U B \text{lb}(1 + \text{SINR}_u) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \text{C1: } \mathbf{a}_{u,m} = \{0,1\} \quad (6)$$

$$\text{C2: } 1 \leq \sum_{m=1}^M a_{u,m} \leq K_{\max}, \forall u \quad (7)$$

$$\text{C3: } N_{\text{ss}} \times \sum_{u=1}^U a_{u,m} \leq N_t, \forall m \quad (8)$$

$$\text{C4: } \text{tr} \left[\sum_{u=1}^U \mathbf{W}_{u,m} \mathbf{W}_{u,m}^H \right] \leq P_{\max}^m, \forall u, m \quad (9)$$

其中, B 表示带宽, SINR_u 表示用户 u 接收信号的 SINR, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵求迹运算, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置。C1 表示传输状态矩阵元素的取值只能是 0 或 1。在实际的无线通信系统中, 由于协调处理带来的精确同步要求、复杂性、CSI 和用户数据交换的回程限制、额外的信号处理和计算开销等方面的约束, 大量的 AP 参与协作是不现实的, 因此 C2 限制了每个边缘 STA 最大的协作 AP 数目为 K_{\max} , 同时, 为了保证边缘用户的服务质量, 用户的服务 AP 数目至少为 1。C3 保障了所有选择 AP_m 进行传输的用户都能获得空间流资源。C4 表示每个 AP 的功率预算限制, AP_m 给所有用户分配的功率之和不能大于其最大发送功率预算 P_{\max}^m 。

假设系统中不同用户的预期接收信号是相互独立的, 噪声之间也是独立的, 则边缘用户 u 接收信号的 SINR 可以表示为

$$\text{SINR}_u = \frac{\sum_{m=1}^M a_{u,m} P_m g_u^m}{\sum_{m=1}^M (1 - a_{u,m}) P_m g_u^m + \sigma_u^2} \quad (10)$$

其中, g_u^m 表示 AP_m 到 STA_u 之间的信道增益, P_m 表示 AP_m 的发送功率。

2) JT 的 DB 预编码

JT 的多用户 D-MIMO 系统中, 一方面, 每个 AP 能够在同一个时隙下给多个 STA 发送信号; 另一方面, 每一个 STA 上接收的信号是全部协作 AP 发送的信号叠加在一起得到的。因此, 任一 STA 除了接收自己的有用信号外, 还会收到 AP 发给其他 STA 的干扰信号, 以及备选 AP 中的非协作 AP 对该 STA 的干扰。由于多个用户在空间上是分开的, 而且不能相互通信, 接收端每个用户只知道自己的 CSI 而不知道其他用户的 CSI, 所以每个用户只能通过各自的接收天线来处理数据。本文采用 BD 预编码技术对 AP 端的发送信号进行预处理, 消除 OBSS 用户间干扰, 并且更加准确高效地检测恢复数据, 使得 AP 协作集完成 JT。

BD 预编码的基本思想是先将多用户 MIMO 信道分解为多个正交的单用户 MIMO 信道, 然后各个用户相互独立地处理各自的数据^[26-27]。参照文献[26]对多 BSS 多用户下行 MIMO 预编码的处理方案, 若要消除等式(4)右边第二项的干扰, 则有效信道矩阵 $\{\mathbf{H}_u \mathbf{W}_i\} (\forall u, i \neq u)$ 能够被块对角化, 即预编码矩阵需要满足

$$\mathbf{H}_u \mathbf{W}_i = \mathbf{0}_{N_r \times N_t}, \forall u, i \neq u \quad (11)$$

为了将式(11)写为矩阵形式, 首先构建除了第 u 个用户外的其他所有用户的信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_u = [\mathbf{H}_1^H, \dots, \mathbf{H}_{u-1}^H, \mathbf{H}_{u+1}^H, \dots, \mathbf{H}_U^H]^H \in \mathbb{C}^{N_r \times LN_r(U-1)}$, 则式(11)等价于

$$\tilde{\mathbf{H}}_u \mathbf{W}_u = \mathbf{0}, \forall u \quad (12)$$

可以看出, \mathbf{W}_u 的列向量是 $\tilde{\mathbf{H}}_u$ 右零空间的一组正交基。对 $\tilde{\mathbf{H}}_u$ 进行 SVD 分解, 得到

$$\tilde{\mathbf{H}}_u = \mathbf{U}_u [\mathbf{A}_u \mathbf{0}] [\mathbf{V}_u^{\text{non-zero}} \mathbf{V}_u^{\text{zero}}]^H \quad (13)$$

其中, \mathbf{A}_u 为对角矩阵, 其对角元素由 $\tilde{\mathbf{H}}_u$ 非零奇异值按从大到小的顺序排列, $\mathbf{U}_u \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}$ 和 $[\mathbf{V}_u^{\text{non-zero}} \mathbf{V}_u^{\text{zero}}] \in \mathbb{C}^{LN_r(U-1) \times LN_r(U-1)}$ 为酉矩阵。矩阵 $\mathbf{V}_u^{\text{non-zero}}$ 和 $\mathbf{V}_u^{\text{zero}}$ 由非零奇异值和零奇异值所对应的

奇异向量组成。 V_u^{zero} 的列向量组成 \tilde{H}_u 右边零空间的一组标准正交基, 即满足 $\tilde{H}_u V_u^{\text{zero}} = 0$, 因此 V_u^{zero} 可以作为第 u 个用户的预编码矩阵, 但是必须满足发送端的天线数之和大于或等于用户的天线数之和, V_u^{zero} 才存在。经过 BD 预编码后, STA_u 的数据落在其他所有干扰用户所在信道的零空间, 消除了用户间干扰, 多用户 MIMO 信道分解为多个正交的单用户 MIMO 信道, 此时等效信道矩阵为

$$\bar{H}_u = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{\text{zero}} & V_2^{\text{zero}} & \cdots & V_U^{\text{zero}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 V_1^{\text{zero}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H_2 V_2^{\text{zero}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & H_U V_U^{\text{zero}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

为了获得正交并行的信道矩阵, 对等效信道矩阵做 SVD 分解

$$H_u V_u^{\text{zero}} = \bar{U}_u \bar{A}_u [\bar{V}_u^{\text{non-zero}} \bar{V}_u^{\text{zero}}]^H \quad (15)$$

因此, 为用户 u 设置的预编码矩阵为

$$W_u = V_u^{\text{zero}} \bar{V}_u^{\text{non-zero}} \quad (16)$$

在接收端乘上接收矩阵 $(\bar{U}_u)^H$ 后, 用户 u 接收到的信号由式(4)变为

$$y_u = \bar{A}_u a_u x_u + n_u \quad (17)$$

综上所述, 假设参与协作的 AP 共享所有的 CSI, 进行联合的预编码。那么基于以上所提的 BD 预编码算法, JT 方案可以完全消除用户间干扰和各用户天线间干扰。值得注意的是, 非协作 AP 的干扰数据仍然存在。

3) 问题求解

本问题的目标是求解出各边缘 STA 的 AP 协作集, 即传输状态矩阵 A , 使得系统边缘用户吞吐量最大。当场景中边缘 STA 总数量为 U , 备选 AP 数为 M 时, AP 协作集存在 $2^{M \times U}$ 种组合, 随着系统中边缘 STA 数目的增多, 组合数也会呈指数级增长, 采用枚举法获得最佳 AP 协作集是不现实的, 需要使用全局最优 (或近最优) 求解算法。因此, 结合本文的实际特点, 选择遗传算法 (GA, genetic algorithm) 求解最佳 AP 协作集选择问题, 原因如下: 本问题是一个离散问题, 传输状态矩阵 A 是一个由

0 或 1 构成的 $U \times M$ 矩阵, 因此无须对解进行编码和解码, 不受 GA 编码复杂这个缺点的影响。其次, 相较于其他优化算法, GA 属于并行搜索, 提高了收敛于全局最优解的概率, 并且没有连续可微的限制, 适用于离散问题。此外, 基于 GA 选择 AP 协作集的方法与枚举法类似, 都是通过给定一个传输状态矩阵, 根据目标函数对该选择进行评价, 选择出使系统性能最佳 (或逼近最佳) 的选择。利用 GA 解决优化问题时遵循生物遗传进化的特点, 按照优胜劣汰的原理, 根据问题域中染色体的适应度大小选择“优质”的个体, 并模拟遗传学中的交叉、变异过程, 产生出代表新的解集的种群, 逐代演化产生出越来越好的近似解^[28]。

GA 在求解较为复杂的优化问题时, 与一些常规的数学优化算法相比, 通常能够以较快的收敛速度获得较好的优化结果。但 GA 本身的一些缺点也限制了它进一步发展, 如传统的 GA 根据经验对交叉概率和变异概率取固定值, 对于不同的函数优化问题, 固定取值不能使算法达到最佳性能, 此外, GA 还存在搜索速度减慢、容易发生“早熟”等缺点^[28]。为此, 本文将从 GA 的交叉和变异参数选择、跳出局部解的机制等方面对传统 GA 做出改进。

1) 引入自适应的概念对传统 GA 重要参数选择问题进行改进, 使得交叉概率和变异概率能够动态自适应取值, 实现有效保留优良个体, 加速淘汰劣质个体, 在保证种群多样性的同时, 保证算法的收敛性。在交叉率或变异率 p 的取值范围内, 将 p 的值与当前种群的适应度值相关联, 表示为

$$p = \begin{cases} (p_{\max} - p_{\min}) \cdot \ln(Af_k + B), & f_k \leq f_{\text{ave}} \\ p_{\max}, & f_k > f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $A = \frac{e-1}{e \cdot (f_{\text{ave}} - f_{\min})}$, $B = \frac{f_{\text{ave}} - e \cdot f_{\min}}{e \cdot (f_{\text{ave}} - f_{\min})}$, p_{\max} 和 p_{\min} 分别表示 p 的最大和最小值, f_k 表示第 k 条染色体的适应度值, f_{ave} 表示当前种群的平均适应度值, f_{\min} 表示当前种群的最小适应度值。

2) GA 出现“早熟”问题的本质原因是随着进化的进行, 种群中各个染色体的相似度增大, 此时选择、交叉、变异的操作已经无法发挥应有的作用, 针对该问题, 定义种群个体适应度值标准差 σ_f , 表示为

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |f_k - f_{\text{ave}}|^2} \quad (19)$$

其中, K 为种群中染色体的数量。 σ_f 描述了当前种群的聚焦程度, σ_f 越大, 染色体之间的差异越大; σ_f 越小, 当前种群的差异性越差。当 $\sigma_f = 0$ 时, 算法很可能陷入了搜索迟钝状态, 发生“早熟”。为了使算法跳出局部最优解, 继续进行有效搜索, 用 count 记录下 $\sigma_f \leq \theta$ 的次数, count 初始值为 0, θ 为适应度标准差的阈值, 变化规则为

$$\begin{cases} \text{count} = \text{count} + 1, \sigma_f \leq \theta \\ \text{count} = 0, \sigma_f > \theta \end{cases} \quad (20)$$

假定算法终止的迭代次数为 S , 若迭代次数小于 $\lfloor S/2 \rfloor$, 且 count 等于常数 T , 则判定算法陷入了局部最优解, 则对当前种群数据进行高斯扰动, 并将变异率增大为 2 倍, 使得算法搜索跳出局部最优。

接下来详细描述利用 IGA 选择 AP 协作集时, 群体初始化、交叉、变异、计算适应度、选择 5 个部分的设计, 基于 IGA 选择 AP 协作集的计算流程如图 3 所示。

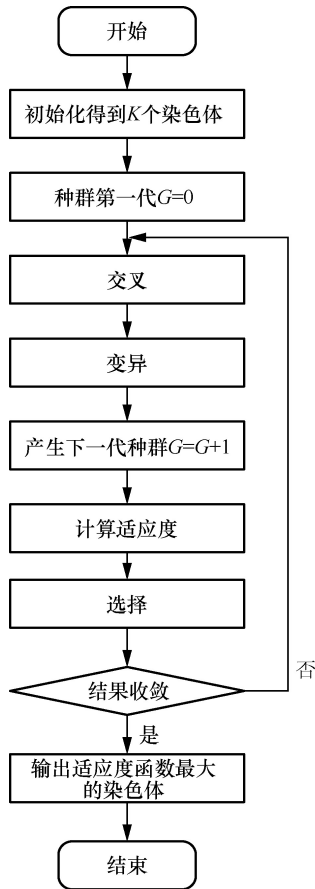


图 3 基于 IGA 选择 AP 协作集的计算流程

步骤 1 群体初始化

随机产生 K 个满足式(6)~式(8)的染色体用以表示各 AP 与边缘 STA 的传输状态, 每个染色体是一个 $U \times M$ 的矩阵, 第 k 条染色体如式(21)所示, 其中 $a_{u,m} \in \{0,1\}$, 表示 AP _{m} 是否为用户 u 服务。

$$Y_k = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,M} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{U,1} & a_{U,2} & \dots & a_{U,M} \end{bmatrix} \quad (21)$$

步骤 2 交叉

在每一代中, 对所有染色体两两配对, 每对染色体以 ε 的概率发生交叉, ε 为依据式(18)求出的交叉率。交叉时, 随机选择一个位置, 将该位置及以下的行向量进行交换。

步骤 3 变异

在每一代中, 每个染色体以 γ 的概率发生变异, γ 为依据式(18)求出的变异率。变异时采取单点变异操作, 即随机在矩阵中选择一个位置, 将该位置的数值取反。

步骤 4 计算适应度

结合求解问题的目标函数, 将系统边缘用户吞吐量作为适应度函数, 染色体 Y_k 的适应度函数为

$$f_k = \sum_{u=1}^U B \ln(1 + \text{SINR}_u) \quad (22)$$

步骤 5 选择

根据各染色体的适应度函数, 首先选择适应度最高的染色体复制到下一代, 并对剩余 $K-1$ 个染色体采用轮盘赌^[29]的方法选择, 即根据式(23)的概率复制到下一代。

$$b_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^{K-1} f_k} \quad (i = 1, 2, \dots, K-1) \quad (23)$$

4 仿真与性能分析

考虑一个密集 Wi-Fi 网络场景, 仿真场景示意图如图 4 所示, 共 5 个同频 AP, AP 的覆盖半径为 10 m, 相邻 AP 间距为 16 m, 每个 AP 下随机分布相同数量的 STA, 各 BSS 内的 STA 数量取[2,10]内的整数, AP 的传输范围存在高度重叠区域, 信道小尺度衰落服从瑞利分布, 路径损耗模型使用标准中的 IEEE 802.11T Gax 传输模型^[30], 设置每个边缘用户最大的协作 AP 数目 K_{\max} 为 3, 仿真参数设置见表 1。

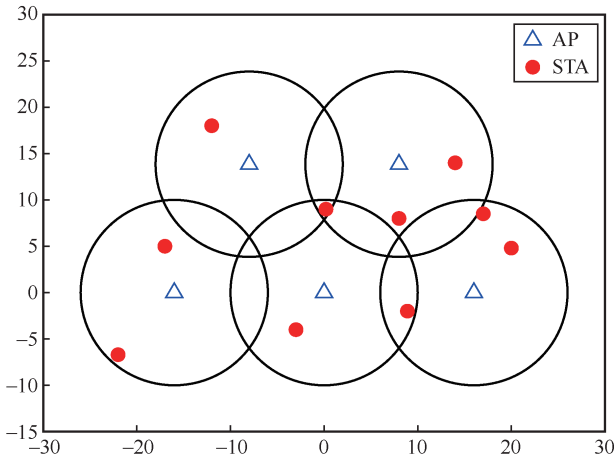


图 4 仿真场景示意图

表 1 仿真参数设置

参数	取值
带宽	80 MHz
AP 工作频率	5.8 GHz
AP 发射功率	24 dBm
AP 数量	5
AP 天线数量	8
STA 数量	10~50
STA 天线数量	1
AP 间距	16 m
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
Wi-Fi 组网半径	10 m
Break Point 距离	10 m
空间流 N _{ss}	1
种群大小	100
交叉概率 ϵ	[0.25,0.6]
变异概率 γ	[0, 0.1]
适应度标准差 σ_f	[0,1]
迭代次数阈值 T	10

首先验证本文提出的基于 IGA 选择 AP 协作集的 JT 方案的有效性。为了对比所提方案的性能提出以下两种基线方案，具体如下。将本文所提方案记为 IGA JT 方案。

基线方案 1：单 AP 传输

每个边缘 STA 选择距离最近的 AP 作为服务 AP，非协作传输中会受到其他同频 AP 传输数据的干扰。该方案记为 Non-cooperative 方案。

基线方案 2：以 N-Best 方式确定 AP 协作集的 JT 方案

每个边缘 STA 选择 N 个 RSSI 最好的 AP 进行联合传输。该方案记为 N-Best JT 方案。

不同方案的边缘用户吞吐量对比如图 5 所示，比较了在用户数为 50、SINR_{th} 为 17 时，采用不同方案下的边缘用户吞吐量性能。可以看出，基于 IGA JT 方案能够获得最好的边缘用户吞吐量，其次是 N-Best JT 方案。在 N-Best JT 方案中，用户的协作 AP 个数确定，且易于找到 RSSI 强度大的 N 个 AP，但是由于 AP 协作集的选择方式固定，某些 AP 协作集内的 AP 对边缘用户吞吐量增益提升并不明显，造成资源浪费。密集 Wi-Fi 网络中边缘用户受到相邻 AP 传输数据的干扰严重，Non-cooperative 方案的边缘用户吞吐量最低。

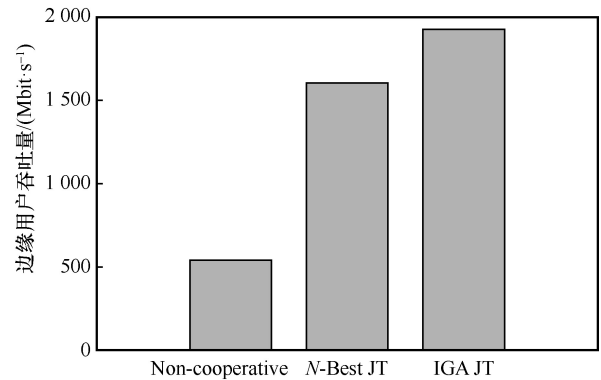


图 5 不同方案的边缘用户吞吐量对比

STA 数量为 40、SINR_{th} 为 17 时，IGA 算法的适应度值（即边缘用户吞吐量）随迭代次数的变化情况如图 6 所示。观察可知，随着迭代次数增多，边缘用户吞吐量逐渐增大后趋于平稳，当种群数目为 100 时，经过 60 次左右迭代即可达到良好的性能。说明本文所提方案能够在较少的迭代次数内实现收敛，通过较低的算法复杂度得到一个较为理想且稳定的性能指标。影响方案收敛时迭代次数的因素包括种群规模、初始种群的选择、遗传算子的选择以及 STA 数目等。种群规模越大、迭代次数越多，得到的最终结果越接近最优解，但相应地也会产生更高的算法复杂度。

SINR_{th} 为 17 时，不同用户数下各方案的边缘用户吞吐量性能对比如图 7 所示，可以看出，当系统中用户数增多时，边缘用户吞吐量在逐渐增大，在不同用户数下，IGA JT 方案始终能够获得最好的边缘用户吞吐量性能。这是因为所提方案

采用 JT 技术, 将相邻 AP 的干扰信号变为有用信号, 通过多个 AP 的协作解决 BSS 间干扰严重导致系统性能下降的问题, 采用 BD 预编码技术, 消除了 OBSS 用户间的数据干扰。并且利用 IGA 对传输状态矩阵进行搜索, 可根据各边缘 STA 与各 AP 之间的信道状态, 尽可能搜索出满足约束条件并且边缘用户吞吐量最大 (或逼近最大) 的传输状态矩阵。

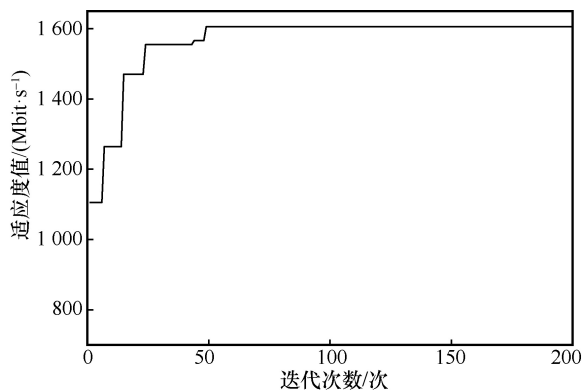


图6 IGA 算法的适应度值随迭代次数的变化情况

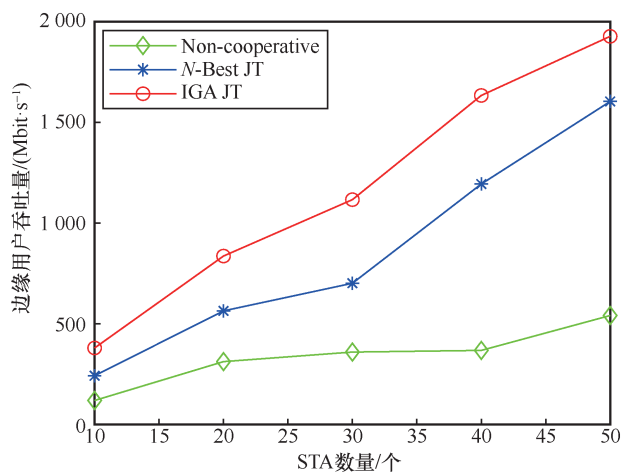


图7 不同用户数下各方案的边缘用户吞吐量性能对比

STA 数量为 40 时, 不同 SINR_{th} 下各方案的边缘用户吞吐量对比如图 8 所示。可以看出, 当 SINR_{th} 增大时, 边缘用户吞吐量逐渐增大, 在不同 SINR_{th} 下, IGA JT 方案均能获得最好的边缘用户吞吐量性能。这是因为所提方案先采用阈值法区分出边缘用户, 然后为这些边缘用户确定其合适的 AP 协作集, 随着设置的 SINR_{th} 增大, 符合条件的边缘用户数增多。总体上看, 越多的边缘用户采用 JT 传输方案, 则越多传输速率低或无法传输的 OBSS 用户的吞吐量和通信质量可以得到提高和改善。

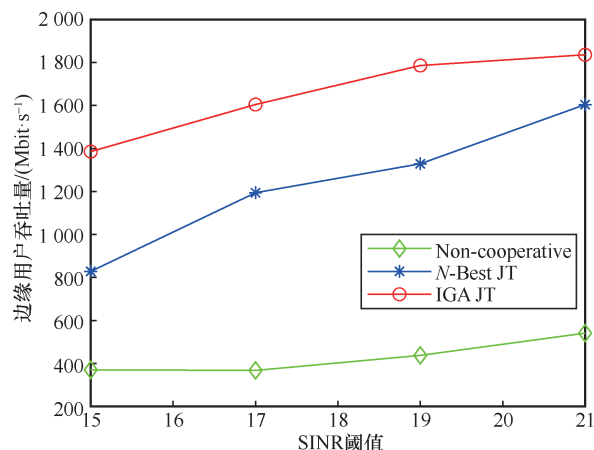


图8 不同 SINR_{th} 下各方案的边缘用户吞吐量对比

5 结束语

本文针对 AP 密集化场景下, AP 间覆盖范围相互重叠, 造成 OBSS 用户受到严重的相邻 AP 的同频干扰, 从而影响接收信号质量的问题。提出了一种基于改进遗传算法选择 AP 协作集的多 AP 联合传输方案。JT 技术通过相互协作的多个 AP 共同为 OBSS 用户服务, 将干扰转化为对用户有用的信号, 并在接收端对多个 AP 的数据进行合并, 进而改善 OBSS 用户的吞吐量性能和通信质量。同时利用 IGA 启发式算法为每个边缘用户搜索出使得边缘用户吞吐量最大的最佳 AP 协作集, 最大化 JT 技术潜在增益。仿真结果表明, 本文所提方案能够有效减小相邻 BSS 之间的干扰, 提高边缘用户的通信质量和吞吐量。

参考文献:

- [1] SHIN K, PARK I, HONG J, et al. Per-node throughput enhancement in Wi-Fi densenets[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 118-125.
- [2] 802.11be Task Group. Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment: enhancements for extremely high throughput (EHT)[S]. 2019.
- [3] DENG C L, FANG X M, HAN X, et al. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: new challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2136-2166.
- [4] VERMANI S. Terminology for AP coordination[S]. Doc: IEEE 802.11-18/1926r, 2018.
- [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] YANG M, LI B. Survey and perspective on extremely high throughput (EHT) WLAN—IEEE 802.11be[J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(5): 1765-1780.
- [7] CHUN J Y. A candidate feature: multi-AP[S]. Doc: IEEE 802.11-22/1515r0, 2022.

- [8] SHARAN N. Coordinated OFDMA protocol[S]. Doc: IEEE 802.11-20/0277r1, 2020.
- [9] DAVIDL Z. Coordinated beamforming/null steering protocol in 802.11be[S]. Doc: IEEE 802.11-19/1594r2, 2019.
- [10] Coordinated spatial reuse performance analysis[S]. Doc: IEEE 802.11-19/1534r1, 2019.
- [11] RYU K, KIM S, PARK S, et al. Consideration on multi-AP coordination for EHT[S]. Doc: IEEE 802.11-18/1982r1, 2019.
- [12] 何晓菲. 密集部署场景下 WLAN 干扰协调技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- HE X F. Research on WLAN interference coordination technology in dense deployment scenario[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [13] YUSUKE T. Consideration on multi-AP coordination[S]. Doc: IEEE 802.11-22/1516r0, 2022.
- [14] SUNDARAVARADHAN S P, PORAT R, TOUSSI K N. Increasing spatial multiplexing gain in future multi-AP Wi-Fi systems via joint transmission[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(2): 20-26.
- [15] 廖力民. 下一代 Wi-Fi 多 AP 并行传输技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- LIAO L M. Research on next generation Wi-Fi multi-AP parallel transmission technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [16] IMPUTATO P, AVALLONE S, MAGRIN D. Multi-AP coordination in Wi-Fi 7 exploiting time resources sharing[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Piscataway: IEEE Press, 2022: 166-171.
- [17] AHN W. Novel multi-AP coordinated transmission scheme for 7th generation WLAN 802.11be[J]. Entropy (Basel, Switzerland), 2020, 22(12): 1426.
- [18] WANG T T, YANG Q, TAN K, et al. DCAP: improving the capacity of Wi-Fi networks with distributed cooperative access points[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(2): 320-333.
- [19] KIHARA Y, KODA Y, YAMAMOTO K, et al. Adversarial reinforcement learning-based robust access point coordination against uncoordinated interference[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [20] 李元昊. 802.11be 多 AP 系统协调传输方案设计与仿真验证[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- LI Y J. Design and simulation verification of coordinated transmission scheme for 802.11be multi-AP system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [21] 3GPP. Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects: TR 36.819 R11v11.2.0[S]. 2013.
- [22] 张浩天. 采用 CoMP 的 UDN 中的簇方法研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- ZHANG H T. Research on clustering method in UDN with CoMP[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [23] TITUS A, BANSAL R, SREEJITH T V, et al. Decision problems for joint transmission in multi-AP coordination framework of IEEE 802.11be[C]//Proceedings of 2021 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 326-333.
- [24] WONG W, CHAN S H G. Distributed joint AP grouping and user association for MU-MIMO networks[C]//Proceedings of IEEE IN-OCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 252-260.
- [25] LI N. Consideration on multi-AP coordination[S]. Doc: IEEE 802.11-19/1129r2, 2019.
- [26] 曹杰. 多用户多小区下行 MIMO 系统预编码技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- CAO J. Research on precoding technology of multi-user and multi-cell downlink MIMO system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [27] 林涛. 无线局域网中的多用户 MIMO 预编码技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LIN T. Research on multi-user MIMO precoding technology in wireless LAN[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [28] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- LEI Y J. MATLAB genetic algorithm toolbox and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.
- [29] 王成, 于菲, 缙锦. 公平席位分配问题在遗传选择操作中的应用[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 667-670, 704.
- WANG C, YU F, GOU J. Application of fair cumulation method for apportioning seats on genetic selecting operation[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 667-670, 704.
- [30] LIU J H. TGax channel model document[EB]. 2014.

[作者简介]



刘曼 (1997-), 女, 西南交通大学信息科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为无线 Wi-Fi 网络。



方旭明 (1962-), 男, 博士, 西南交通大学信息科学与技术学院教授, 主要研究方向为通信感知计算一体化网络、Wi-Fi 网络、智能交通移动通信系统等。