

## Wi-Fi 7 多链路高效联合传输优化策略

戴林燕, 方旭明, 何蓉

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 下一代 Wi-Fi 7 协议多链路非同步传输与接收模式下, 多链路设备 (MLD, multi-link device) 在各个链路的传输结束时间需要对齐, 可能需要进行数据填充 (padding), 从而导致频谱资源和能量的浪费。提出了一种 MLD 高效传输算法, 在满足数据传输时延限制的前提下, 提高 MLD 站点 (STA, station) 总能效。所提算法分别从链路数据分发比例、通信资源与 STA 发送功率 3 个方面进行优化。仿真结果显示, 所提算法在保证数据传输时延限制的前提下, 通过减少 padding 数据降低能耗, 使系统传输能效相较于基线方案提升约 150%。

**关键词:** Wi-Fi 7; 多链路; 能效; 数据填充; 粒子群优化

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00328

## Optimization strategy of multi-link energy efficient joint transmission of Wi-Fi 7

DAI Linyan, FANG Xuming, HE Rong

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

**Abstract:** In the multi-link non-simultaneous transmit and receive mode of next-generation Wi-Fi 7 protocol, the transmission ending time of multi-link device (MLD) needs to be aligned on each link, which may require data padding, resulting in the waste of spectrum resources and transmission energy consumption. A high energy efficient MLD transmission algorithm was proposed to improve the total energy efficiency of MLD station (STA) on the premise of meeting the data transmission delay limit. The proposed algorithm was optimized from the following three aspects: link data distribution ratio, communication resource allocation and STA transmission power. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce energy consumption by reducing padding data on the premise of guaranteeing the delay limit of data transmission, and the transmission energy efficiency of the system is increased by about 150% compared with that of the baseline scheme.

**Key words:** Wi-Fi 7, multi-link, energy efficient, data padding, particle swarm optimization

### 0 引言

在下一代 Wi-Fi 标准 IEEE 802.11be (即 Wi-Fi 7) 协议中, 多链路操作 (MLO, multi-link operation) 是提升系统性能的一项重要技术<sup>[1-2]</sup>。MLO 技术与

之前 Wi-Fi 标准中定义的多频段技术虽有一定相似性, 但也有较大差别。IEEE 802.11n/ax/ad 标准中接入点 (AP, access point) 支持多频段并行工作, 支持多频多发, 但站点 (STA, station) 受限于天线和基带资源, 一般采用双频单发 (DBSC, dual band single

收稿日期: 2022-10-28; 修回日期: 2023-03-22

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); 四川省应用基础研究项目 (No.2020YJ0218)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62071393), The Sichuan Provincial Applied Basic Research Project (No.2020YJ0218)

concurrent)<sup>[3]</sup>。STA 每次只能选择一个频段进行连接和传输,一对节点之间的数据传输在同一时刻只能在一个频段进行,即 STA 无法获得多链路带来的性能增益。Wi-Fi 7 中引入的多链路技术支持一对多链路设备(MLD, multi-link device)在 2.4 GHz、5 GHz 和 6 GHz 频段并发传输,且 3 个频段/链路之间可进行一定程度的协同,不仅增加了多链路设备可用频谱资源,也提高了频谱资源利用的灵活性。

虽然多链路技术的引入可以有效提升系统吞吐量与时延性能,但与传统单链路操作相比,MLO 技术引入了更大链路维护/传输能耗与填充(padding)数据传输能耗。MLD 的每条链路配置了独立的发送/接收机,需要在各链路上进行信道监听等操作,因此,数据传输、链路维护所消耗的能量会成倍增加<sup>[4]</sup>。同时,MLO 定义了同步传输与接收(STR, simultaneous transmit and receive)和异步传输与接收(NSTR, non-simultaneous transmit and receive)两种操作模式<sup>[5-6]</sup>,多链路操作模式示意图如图 1 所示。其中,STR 模式下各链路可独立进行数据的传输与接收,允许在一条链路发送数据的同时,另一条链路接收数据。而 NSTR 模式下各链路的收发状态需要保持一致,即不允许在一条链路发送数据的同时,另一条链路接收数据。当 MLD 工作在 STR 模式下,不同链路同时进行数据的发送与接收时,发送链路与接收链路之间可能会产生邻频干扰,这种干扰被称为设备内共存(IDC, in-device coexistence)干扰<sup>[7-8]</sup>。无法消除 IDC 干扰的 MLD 被称为 NSTR 设备,能够消除 IDC 干扰的 MLD 被称为 STR 设备。

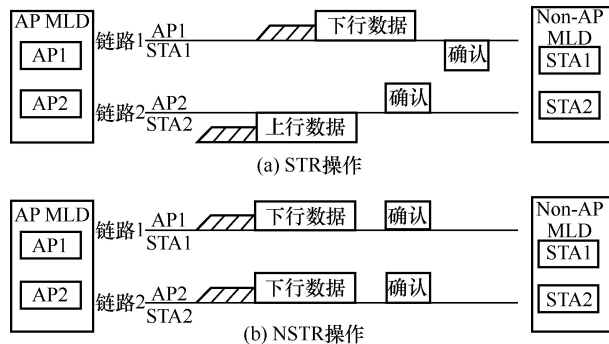


图 1 多链路操作模式示意图

为了避免 IDC 干扰影响,NSTR 设备需要工作在 NSTR 模式,在发送数据时,不同链路的传输结束时间需要保持对齐<sup>[9-10]</sup>。由于不同链路的传输能力及缓存数据量可能存在差异,若需要对齐传输结

束时间,往往需要在某些链路上进行数据填充,通过数据填充对齐结束时间示意图如图 2 所示。而 padding 数据通常为全 0 bit<sup>[11]</sup>,无法携带有用信息,会导致频谱资源的浪费,也会使 MLD 产生更大的传输能耗。

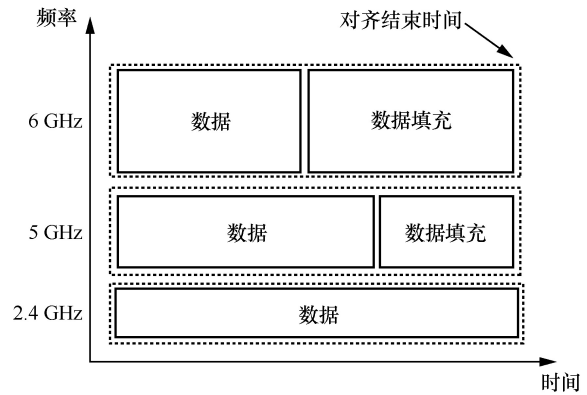


图 2 通过数据填充对齐结束时间示意图

现有关于 Wi-Fi 网络能效管理的研究大多针对单链路场景。常用的方案包括:改进现有协议中的节能模式(PSM, power save mode)<sup>[12-13]</sup>、目标唤醒时间(TWT, target wake time)<sup>[14-15]</sup>等机制提高能效;适当降低节点的发送功率<sup>[16]</sup>、带宽<sup>[17]</sup>以及空间流数目<sup>[18]</sup>等操作实现节能;关闭冗余接入点<sup>[19]</sup>或增大网络中周期性发送的控制帧/管理帧实现节能<sup>[20]</sup>。文献[21]提出了一种 AP 休眠结合用户卸载的方案,通过测量 AP 能效设置休眠或清醒阈值,根据实时网络状态信息选择利用率低的 AP 进行睡眠,并将用户卸载问题建模为反向拍卖,在最小化用户卸载能耗的同时,保持用户吞吐量。文献[22]研究 TWT 机制中同时唤醒节点数量、可使用的资源单元(RU, resource unit)数量等参数对吞吐量和能效的影响,提出了一种通过决定是否接受 TWT 请求来协商目标信标传输时间的 TWT 调度方案。

在针对多链路场景的能效管理方案中,研究者大多从降低链路的维护/传输能耗角度进行优化。例如,文献[23]提出了一种交叉链路唤醒方案。AP 通过在主链路上发送携带唤醒链路信息的新信标帧来唤醒其他休眠链路。文献[24]提出使用 STA 每条链路的电源状态来指示链路状态,AP 只能在 STA 处于活跃状态的链路上为其发送数据。文献[25]提出在多链路中扩展常规流量指示信息(TIM, traffic indication message)机制以指示 STA 多条链路的信息情况。

通过上述分析可以发现,在现有多链路能效管

理研究中，鲜有从减小 padding 数据传输能耗的角度进行优化。在实际多链路传输中，padding 无效数据传输导致的频谱资源和传输能耗的浪费也不可忽视，如何高效地协同管理各链路的传输状态，实现多链路高效联合传输是需要解决的一个关键问题。

因此，本研究针对多链路场景下链路传输结束时间对齐导致的 padding 数据问题，在满足数据传输时延限制的前提下，以提高 MLD STA 总能效为目标，提出了一种多链路高效联合传输算法，分别从链路数据分发比例、通信资源分配与 STA 发送功率 3 个方面进行了优化，减少 padding 数据及其产生的能量浪费，提高传输能效。

### 1 系统模型

本文所研究场景假设由一个 MLD AP 和  $N$  个关联的 MLD STA 组成，AP 和 STA 设备均支持 3 条链路，系统场景如图 3 所示。

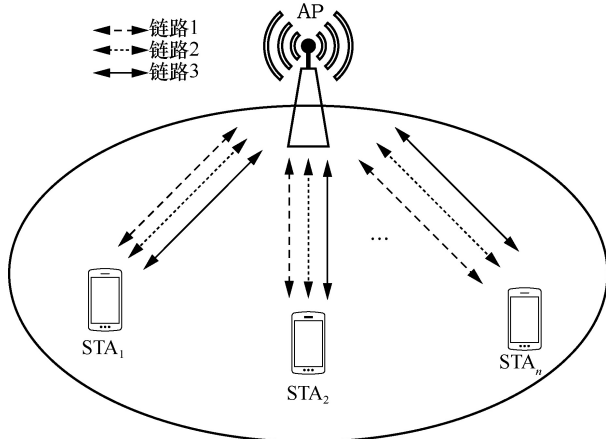


图 3 系统场景

当节点在多个链路同时竞争成功时，可以将数据分发到多条链路上同时传输。本文主要关注如何提高 STA 侧的上行传输能效，假设  $STA_n$  ( $n=1,2,3,\dots,N$ ) 的上行缓存数据量用  $D_n$  表示，且数据可以分割成任意比例分配到不同的链路上传输，并利用  $x_{n,m}$  表示  $STA_n$  在链路  $m$  ( $m=1,2,3$ ) 上分发的数据比例 ( $x_{n,m} \in [0,1]$ )。那么， $STA_n$  在链路  $m$  上待传的数据量则表示为

$$D_{n,m} = x_{n,m} \times D_n \quad (1)$$

假设  $STA_n$  在链路  $m$  上分配得到的 RU 大小为  $r_{n,m}$ ，根据 SNR、RU 规格与调制与编码策略 (MCS,

modulation and coding scheme) 速率之间的映射关系，可得到  $STA_n$  在链路  $m$  上的数据传输速率为

$$v_{n,m} = \text{MCS\_mapping}(r_{n,m}, \text{SNR}_{n,m}) \quad (2)$$

由此，可计算出  $STA_n$  在链路  $m$  上的数据传输时延为

$$t_{n,m}^{\text{DATA}} = \frac{D_{n,m}}{v_{n,m}} \quad (3)$$

沿用 IEEE 802.11ax/be 标准中基于正交频分多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) 的多用户传输方式<sup>[9, 11]</sup>，同一链路不同 STA 的传输结束时间需要对齐。OFDMA 对齐后， $STA_n$  在链路  $m$  上的传输时延为

$$t_{n,m}^{\text{OFDMA}} = \begin{cases} \max_{n \in \mathcal{M}_m} (t_{n,m}^{\text{DATA}}), & x_{n,m} > 0 \\ 0, & x_{n,m} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中， $\mathcal{M}_m$  表示在链路  $m$  上分发了数据，需要进行数据传输的 STA 集合。

同时，为了避免 MLD 受 IDC 影响，同一 NSTR MLD 在多条链路进行数据传输时，各链路的传输结束时间必须对齐。 $STA_n$  在链路  $m$  上最终的传输时延表示为

$$t_{n,m} = \begin{cases} \max_{m \in \mathcal{L}_n} (t_{n,m}^{\text{OFDMA}}), & f_n^{\text{NSTR}} = 1 \text{ 且 } \text{LN}_n > 1 \\ t_{n,m}^{\text{OFDMA}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中， $\mathcal{L}_n$  表示  $STA_n$  进行数据传输的链路集合； $f_n^{\text{NSTR}}$  表示  $STA_n$  是否为 NSTR MLD 的指示，为 1 时表示  $STA_n$  是 NSTR MLD； $\text{LN}_n$  表示  $STA_n$  进行数据传输的链路数量。在采用 OFDMA 多用户传输方式下，完成各链路传输结束时间对齐后，可能导致某些链路上不同 STA 传输时间不对齐，此时需要再进行一次 OFDMA 对齐，对齐方式如式(4)所示。

假设在数据传输过程中， $STA_n$  在链路  $m$  上的功率用  $p_{n,m}$  表示， $p_{n,m}$  分为两种类型，当  $STA_n$  在链路  $m$  上进行数据传输时， $p_{n,m}$  为数据发送功率；当  $STA_n$  在链路  $m$  上无数据传输时， $p_{n,m}$  为监听信道功率。因此， $p_{n,m}$  表示为

$$p_{n,m} = \begin{cases} p_{n,m}^{\text{tra}}, & x_{n,m} > 0 \\ p^{\text{lis}}, & x_{n,m} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则所有 STA 的传输总能耗表示为

$$E^{\text{sum}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{n,m} \times t_{n,m} \quad (7)$$

因此,系统 STA 的总能效(即传输数据量与能耗之比)表示为

$$EE^{\text{sum}} = \frac{\sum_{n=1}^N D_n}{E^{\text{sum}}} \quad (8)$$

本文的优化目标为通过联合优化链路数据分发比例、通信资源和 STA 发送功率,实现在满足数据传输时延限制的前提下,最大化系统 STA 总能效。因此,优化问题可归纳为

$$P: \max_{x, R, P} EE^{\text{sum}} \quad (9)$$

$$\text{s.t. C1: } 0 \leq x_{n,m} \leq 1, \forall m, \forall n \quad (10)$$

$$\text{C2: } \sum_{m=1}^M x_{n,m} = 1, \forall n \quad (11)$$

$$\text{C3: } \sum_{n \in \mathcal{A}_m} r_{n,m} \leq B_m, \forall m \quad (12)$$

$$\text{C4: } 0 \leq p_{n,m} \leq p_{n,m}^{\text{max}}, \forall m, \forall n \quad (13)$$

$$\text{C5: } \max_m(t_{n,m}) \leq \tau_n, \forall n \quad (14)$$

其中, C1 表示 STA 在各链路分发的数据比例取值范围; C2 表示 STA 在竞争接入成功的各链路分发的数据比例之和为 1; C3 表示所有 STA 在一条链路上被分配的 RU 大小之和不能超过该链路的工作信道总带宽; C4 表示 STA 的发送功率不能超过其最大发送功率; C5 表示 STA 的传输时延需要满足其时延限制。

## 2 多链路高效联合传输策略

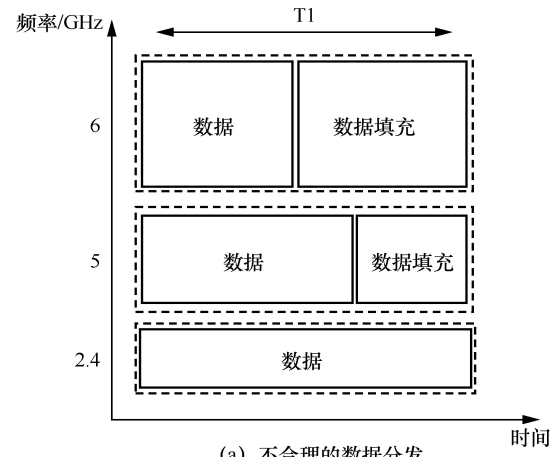
本文在满足数据传输时延限制的前提下,以最大化 STA 总能效为优化目标,提出了一种多链路高效传输算法,从数据分发比例、通信资源分配与 STA 发送功率 3 个方面进行优化。相应地,该算法可分为:数据分发比例决策、通信资源分配、STA 发送功率调整 3 个子模块。

首先,随机产生一组数据分发比例,通信资源分配模块决策出各链路的 RU 分配结果。随后,STA 发送功率调整模块根据 STA 数据传输时延限制调整 STA 发送功率。然后计算各数据分发比例的能效,利用数据分发比例模块通过启发式算法对能效最大的近似最优解进行迭代搜索,得到数据分发比例、通信资源分配结果、STA 发送功率调整的最终结果。需要说明的是,3 个子模块均在 AP 侧执行,

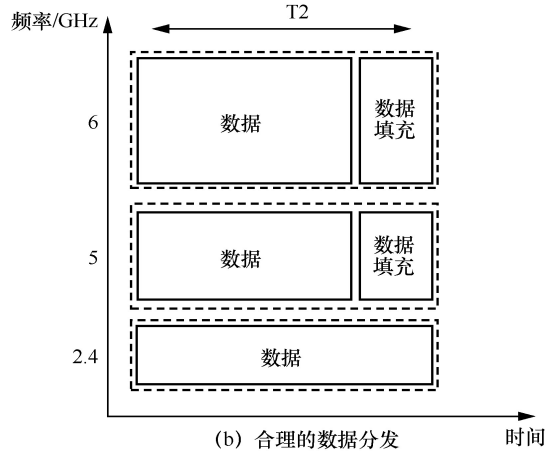
由 AP 对所有 STA 的相关参数进行统一决策。3 个子模块的具体设计思路如下。

### 2.1 数据分发比例决策

padding 传输能耗开销示意图如图 4 所示,由于不同链路的工作频率、带宽、信道条件等因素存在差异,分发到各链路传输的数据比例会影响各链路的传输时间。不合理的数据分发,可能会导致不同链路传输结束时间差异过大,产生较大的 padding 传输能耗开销,如图 4(a)所示。因此,MLD 在进行数据传输时,应该结合各链路传输能力,合理地将数据分发到不同链路上传输,尽可能少甚至不产生 padding 传输能耗开销,以提高传输能效,如图 4(b)所示。



(a) 不合理的数据分发



(b) 合理的数据分发

图4 padding 传输能耗开销示意图

粒子群算法<sup>[26-27]</sup>是一种模拟自然界的生物活动以及群体智能的随机搜索算法,通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。该算法简单易实现,对优化问题不存在求导和函数连续性的限制,采用概率化的寻优方式,无须自行设计规则就能自动获取和指导优化的搜索空间,适用于连续变量的

求解。因此，本文采用粒子群算法对数据分发比例决策问题进行求解。粒子群算法流程如图 5 所示。

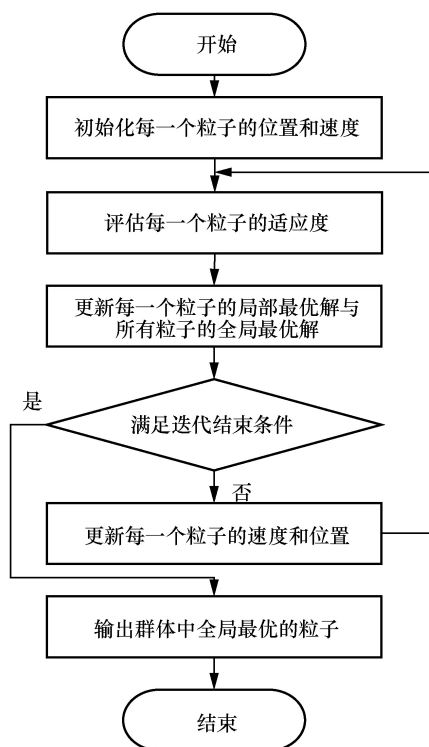


图 5 粒子群算法流程

利用粒子群算法求解数据分发问题的具体流程如下。

**步骤 1** 初始化每一个粒子的位置和速度。

随机生成  $K$  个粒子组成一个种群，每个粒子都包含了两个特征：位置与速度。位置通常为待求解的变量，数据分发比例决策  $\mathbf{X}$  为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,M} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \dots & x_{N,M} \end{bmatrix} \quad (15)$$

速度通常表示为位置的变化量，用于在每次迭代中决定位置的突变，数据分发比例的变化量  $\mathbf{V}$  为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & v_{1,M} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & v_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N,1} & v_{N,2} & \dots & v_{N,M} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中， $v_{i,j}$  表示 STA<sub>*i*</sub> 在链路  $j$  上数据分发比例的变化量，且  $v_{i,j} \in [0,1], \forall i, \forall j$ 。

**步骤 2** 评估每一个粒子的适应度。

根据适应度函数，计算每一个粒子的适应度。

适应度是用来衡量粒子是否“优质”的一个指标，适应度越大，距离最优解越近，粒子越“优质”。适应度函数通常利用优化问题的目标函数进行构建，本文的优化目标是最大化 STA 总能效，因此考虑将 STA 总能效作为适应度函数。为避免仅考虑能效而忽略系统时延性能的情况，本文在适应度函数中引入了时延指标作为惩罚因子。适应度函数表示为

$$f(\mathbf{X}) = \frac{EE(\mathbf{X})}{\beta} \quad (17)$$

其中， $EE(\mathbf{X})$  表示数据分发比例决策  $\mathbf{X}$  所对应的 STA 总能效， $\beta$  表示时延惩罚因子，表示为

$$\beta = \prod_{i=1}^N \left( \max_i \left\{ 1, \frac{t_{i,m}}{\tau_i} \right\} \right) \quad (18)$$

其中， $\tau_i$  表示 STA<sub>*i*</sub> 缓存数据的时延限制。

**步骤 3** 更新每一个粒子的局部最优解与所有粒子的全局最优解。

若粒子  $k$  当前的适应值优于之前记录的该粒子局部位置最优解，则更新局部最优解。若粒子  $k$  当前的适应值优于之前记录的全局位置最优解，则更新全局最优解。

**步骤 4** 判断是否满足迭代结束条件。

若全局最优解符合迭代结束条件，则跳转到步骤 6，否则跳转到步骤 5。

**步骤 5** 更新每一个粒子的速度和位置。

粒子根据式(19)、式(20)更新自己的速度和新的位置，并跳转到步骤 2。

$$v_k = \omega v_k + c_1 \varepsilon (\text{pbest}_k - x_k) + c_2 \eta (\text{gbest} - x_k) \quad (19)$$

$$x_k = x_k + r v_k \quad (20)$$

其中， $\text{pbest}_k$  表示粒子  $k$  搜索到的历史最优； $\text{gbest}$  表示全部粒子搜索到的历史最优； $\omega$  是保持原来速度的系数，为惯性权重； $c_1$ 、 $c_2$  分别是自己历史最优值权重和群体最优值权重； $\varepsilon$  和  $\eta$  是  $[0,1]$  区间均匀分布的随机数； $r$  是位置更新时速度前的系数，即约束因子。

**步骤 6** 输出群体中全局最优的粒子。

根据每一个粒子的适应度，选择适应度最大的粒子作为数据分发比例决策。

## 2.2 通信资源分配

IEEE 802.11ax 定义了以 RU 为单位的最小通信资源粒度，每个 RU 由若干个子载波构成。对于一个给定的数据分发比例决策，本文采用基于权重优

先的方式为各链路的 STA 分配 RU 资源。基于权重优先的 RU 资源分配算法的主要思路是将 STA 按照所设定权重由大到小排序, 并且优先为大权重的 STA 分配大规格的 RU, 具体流程如下。

### 步骤 1 计算 STA 权重。

为了满足 STA 传输需求, 应该为待传数据量大、时延限制紧迫的 STA 分配大规格 RU。同时为了平衡各 STA 的传输能力, 避免信道条件差的 STA 分配到小规格 RU, 产生较大传输时延, 导致大量 padding 产生的问题, 应该为信道条件差的 STA 分配大规格 RU。因此, STA 的权重主要考虑了 3 个方面的因素, 分别是 STA 待传数据量大小、数据传输时延限制以及 STA 传输能力。链路  $m$  上 STA $_n$  权重  $z_{n,m}$  为

$$z_{n,m} = \alpha \left( \frac{v_{n,m}^{\min}}{\sum_{n \in \mathcal{M}_m} v_{n,m}^{\min}} \right) + \beta \left( \frac{\frac{1}{C_{n,m}}}{\sum_{n \in \mathcal{M}_m} \frac{1}{C_{n,m}}} \right) \quad (21)$$

其中,  $v_{n,m}^{\min}$  表示 STA $_n$  在链路  $m$  上的最小速率需求;  $C_{n,m}$  表示 STA $_n$  在链路  $m$  上的传输能力;  $\alpha$ 、 $\beta$  表示权重系数,  $\alpha + \beta = 1$ 。  $v_{n,m}^{\min}$  为

$$v_{n,m}^{\min} = \frac{x_{n,m} D_n}{\tau_n} \quad (22)$$

引入该权重的目的是优先为数据量大、时延紧急的 STA 分配大规格 RU。另一权重因子  $C_{n,m}$  为

$$C_{n,m} = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_{n,m}^{\max} g_m}{N_0 B_m} \right) \quad (23)$$

其中,  $p_{n,m}^{\max}$  为 STA $_n$  在链路  $m$  上的发送功率, 在未进行功率调整前, 默认 STA 采用最大发送功率进行数据传输;  $g_m$  表示链路  $m$  上的损耗系数;  $N_0$  表示底噪。将  $C_{n,m}$  的倒数作为权重因子的目的是平衡 STA 的传输能力与所分配 RU 规格, 为传输能力差的 STA 分配大规格 RU, 使同一链路上 STA 传输的结束时间尽可能对齐, 减少 padding 传输开销。

### 步骤 2 根据链路上有待传输数据的 STA 的

数量与链路带宽, 确定所有可能的 RU 规格组合。

假设链路上有  $N$  个 STA 需要进行数据传输, 如果链路带宽可划分的最大 RU 数量  $N_{\max}^{\text{RU}} \geq N$ , 则 AP 将该链路带宽划分为  $N$  个 RU。若  $N_{\max}^{\text{RU}} < N$ , 说明通信资源最多只能满足  $N_{\max}^{\text{RU}}$  个 STA 的传输需求, 则 AP 将带宽划分为  $N_{\max}^{\text{RU}}$  个 RU, 满足优先级最高的前  $N_{\max}^{\text{RU}}$  个 STA 的传输请求。在确定需要划分的 RU 数量后, 在尽可能少地浪费子载波情况下, 列举出所有可能的 RU 规格组合。80 MHz 带宽下 RU 规格组合划分见表 1。

**步骤 3 RU 规格匹配。**首先, 在各链路上对各个 STA 的权重进行归一化处理  $z'_{n,m} = z_{n,m} / \sum_{n \in \mathcal{M}_m} z_{n,m}$ , 并根据各 STA 优先级  $z'_{n,m}$  进行 RU 规格匹配, 将 RU 规格匹配问题转化为最小化 STA 优先级之比与 RU 规格之比的欧氏距离的问题。

$$r_m^* = \arg \min \sqrt{\left( z'_{1,m} - \frac{r_{1,m,r}}{B_m} \right)^2 + \dots + \left( z'_{N,m} - \frac{r_{N,m,r}}{B_m} \right)^2} \quad (24)$$

$$B_m = \sum_{i=1}^N r_{i,m,r} \quad (25)$$

其中,  $r_{i,m,r}$  表示在链路  $m$  上第  $r$  种 RU 规格组合中第  $i$  个 RU 的大小。通过遍历步骤 2 中确定的 RU 规格组合, 找到一个 RU 规格与 STA 权重欧氏距离最小的组合作为最优组合。最后, 根据 STA 权重排序, 优先将组合中大规格 RU 分配给权重大的 STA 使用。

### 2.3 STA 发送功率调整

在现有技术中, 对齐传输时间通常采用 padding 的方式填充数据包<sup>[28]</sup>, 不仅浪费了通信资源, 也增加了能耗。所以, 在发送数据时, 在需要对齐的传输结束时间确定后, 可以通过适当降低发送功率, 延长传输结束时间实现对齐, 进一步降低发送能耗, 提高传输能效。由于每一个 STA 的各条链路都有一套收发机, 在完成数据分发和通信资源分配决策后, 可根据数据传输时延限制, 通过调整各 STA 在各链路上的发送功率, 在尽量减少 padding 前提

表 1

80 MHz 带宽下 RU 规格组合划分

带宽	RU 规格组合 (x-tone)			
80 MHz	1)	484, 106, 106, 106, 106, 26	5)	484, 106, 106, 106, 52, 52
	2)	484, 242, 106, 52, 26	6)	242, 242, 106, 106, 106, 106
	3)	242, 242, 242, 106, 106, 26	7)	484, 242, 52, 52, 52, 52
	4)	484, 242, 106, 52, 26, 26	8)	484, 106, 106, 106, 52, 52

下, 对齐各 STA 各链路传输时间, 具体流程如下。

**步骤 1** 分别计算各链路上各 STA 采用最大发送功率传输情况下的传输时延。首先, 计算 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上的 SNR

$$\text{SNR}_{n,m} = p_{n,m}^{\max} + G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} - \text{PL}_{n,m} - N_{n,m} \quad (26)$$

其中,  $G_{\text{tx}}$  和  $G_{\text{rx}}$  分别表示发送天线增益和接收天线增益,  $\text{PL}_{n,m}$  表示 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上的路径损耗,  $N_{n,m}$  表示 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上的底噪。然后, 根据式(2) 可得到 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上的数据传输速率  $v_{n,m}$ 。最后, 利用式(3)可计算得到 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上的传输时延  $t_{n,m}^{\text{DATA}}$ 。

**步骤 2** 根据时延限制调整 STA 发送功率。

在调整 STA 发送功率之前, 首先分析信道带宽与传输数据量一定时, 发送能耗与发送功率之间的关系。根据 IEEE 802.11ax 标准, 传输速率 *V* 与 MCS 呈一一对应的离散映射关系, 难以直接给出能耗 *E* 与发送功率 *p* 的函数表达式。实际的传输速率与香农容量成正相关, 为了便于分析发送功率 *p* 对能耗的影响, 此处将传输速率 *V* 替换为香农容量, 则可以将能耗表示为

$$E(p) = \frac{pD}{v} = \frac{pD}{b \text{lb} \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right)} \quad (27)$$

其中, *D* 表示 STA 的缓存数据量, *p* 表示发送功率, *b* 表示竞争上的信道带宽, *g* 为信道增益,  $N_0$  为高斯白噪声功率谱密度。E(*p*) 的一阶导数 E'(*p*) 可以表示为

$$E'(p) = \frac{D}{b} \times \frac{\frac{pg}{N_0 b} \text{lb} \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right) - \frac{pg}{N_0 b}}{\text{lb}^2 \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right)} \quad (28)$$

令

$$\varepsilon(p) = \text{lb} \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right) - \frac{\frac{pg}{N_0 b}}{\text{lb}^2 \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right)} \quad (29)$$

则  $\varepsilon(p)$  的一阶导数  $\varepsilon'(p)$  可以表示为

$$\varepsilon'(p) = \frac{\frac{g^2 p}{N_0^2 b^2}}{\text{ln}^2 \left( 1 + \frac{pg}{N_0 b} \right)^2} \quad (30)$$

可见, 当  $p > 0$  时,  $\varepsilon'(p) > 0$ ,  $\varepsilon(p)$  单调递增, 所以  $\varepsilon(p) > \varepsilon(0) = 0$ , 即  $\varepsilon(p) > 0$ , 因此 E(*p*) 单调递增。当信道带宽与传输数据量一定时, 发送能耗随功率增大而增大。

在 MLD STA 上行传输过程中, 各 STA 各链路上的最大传输时延  $T^{\max}$  与各 STA 最小传输时延限制  $\tau^{\min}$  之间的关系可能存在两种情况, 即  $T^{\max} < \tau^{\min}$ 、 $T^{\max} \geq \tau^{\min}$ 。当  $T^{\max} < \tau^{\min}$  时, STA 发送功率调整如图 6 所示, STA 可适当降低发送功率, 使传输时延恰好与  $\tau^{\min}$  对齐, 既避免了 padding 的资源浪费, 又实现了满足时延限制前提下降低传输能耗、最大化能效的目的。

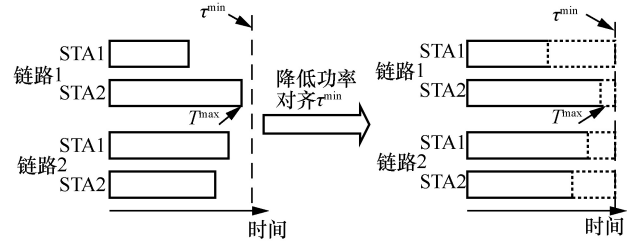


图 6 STA 发送功率调整 ( $T^{\max} < \tau^{\min}$ )

当  $T^{\max} \geq \tau^{\min}$  时, STA 发送功率调整如图 7 所示, 说明传输时延为  $T^{\max}$  的 STA 即使采用最大功率发送, 也无法满足时延限制。同时, 由于 NSTR STA 在所有分发数据的链路上的传输结束时间必须对齐, 因此, 传输结束时间需要与  $T^{\max}$  对齐。此时, 传输时延小于  $T^{\max}$  的 STA 可以进行功率调整, 适当降低发送功率, 使得传输时延与  $T^{\max}$  对齐。

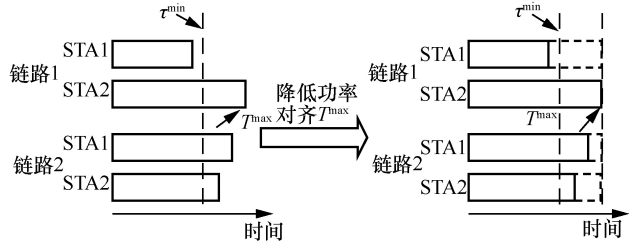


图 7 STA 发送功率调整 ( $T^{\max} \geq \tau^{\min}$ )

STA 功率调整具体过程如下。

首先, 确定所需要对齐的传输结束时间, 表示为

$$t^{\text{uplink}} = \begin{cases} T^{\max}, & T^{\max} \geq \tau^{\min} \\ \tau^{\min}, & T^{\max} < \tau^{\min} \end{cases} \quad (31)$$

然后, 根据 STA<sub>*n*</sub> 在链路 *m* 上待传的数据量和  $t^{\text{uplink}}$ , 结合式(22)计算出所对应的传输速率需求

$v_{n,m}^{req}$ 。然后,利用 SNR、RU 规格与 MCS 速率之间的映射关系,得到满足  $v_{n,m}^{req}$  需求所对应的  $SNR_{n,m}^{req}$ 。

最后,计算得到调整后的 STA 发送功率,表示为

$$p_{n,m} = SNR_{n,m}^{req} - G_{tx} + G_{rx} - PL_{n,m} - N_{n,m} \quad (32)$$

### 3 仿真性能分析

假设网络中存在 1 个 AP 和 8 个位置各不相同的 STA,所有设备均为 MLD,各 STA 的缓存数据量与数据时延限制在一定范围内随机取值。仿真参数见表 2。

为了验证本文所提算法在能效、时延性能方面的提升,本文设置了 4 种基线方案进行对比分析。方案对比见表 3。

STA 总能耗与传输数据量关系如图 8 所示,横坐标的范围表示各 STA 从该范围中随机选择一个数作为传输数据量。

从图 8 可以看出,随着 STA 传输数据量的增加,STA 总能耗不断增加,但对于同一任务量,相比于 4 种基线方案,采用所提算法的 STA 总能耗最小。其中,基线 2、基线 3、基线 4 分别在功率分配、RU 分配和链路数据分配步骤中采用了所提算法,相比于均不采用所提算法的基线 1,STA 总能耗均有所下降,这是因为,按链路带宽比例分发数据并未考虑 STA 在各链路上分配到的实际带宽,而均分 RU 也并未考虑同一链路上不同 STA 待传数据量、时延限制、信道条件等因素的差异,这可能会导致待传数据量与信道带宽间的不匹配,

造成较大的 padding 能耗开销。同时,所有 STA 均采用最大发送功率方式没有考虑 STA 实际的传输时延需求,可能会产生更大的传输能耗。通过基线 2、基线 3、基线 4 与基线 1 的比较,分别验证了所提的 3 个子模块算法均能有效降低 STA 总能耗。

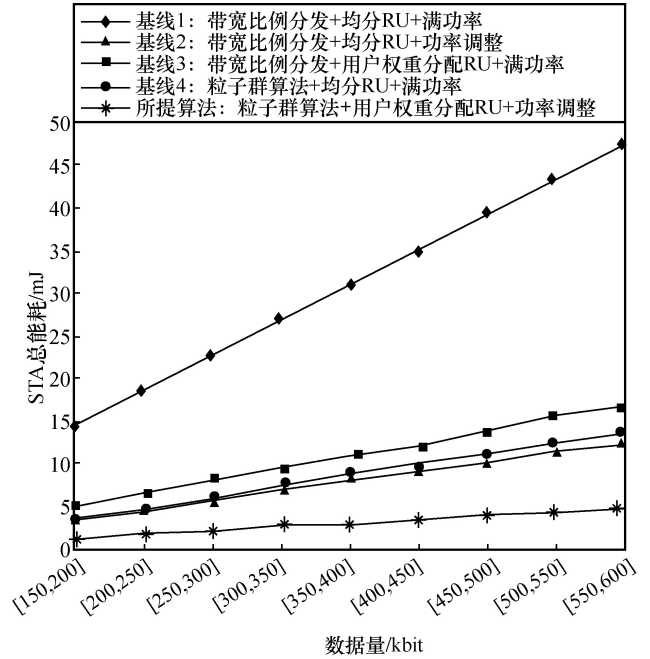


图 8 STA 总能耗与传输数据量关系

STA 总能效与传输数据量关系如图 9 所示。随着传输数据量增加,传输能耗也会相应增加。因此,随着 STA 传输数据量的增加,对于同一种传输策略,能效基本保持不变。相比于其他 4 种基线方案,所提算法的 STA 总能效最高。

表 2

仿真参数

仿真参数	设定值	仿真参数	设定值
支持频带/GHz	2.4/5/6	种群大小	50
最大带宽/MHz	40/160/320	最大迭代次数	30
STA 发送功率/dBm	15/15/15	惯性权重 $\omega$	1
发送/接收天线增益/dB	2	历史最优值权重 $c_1$	2
噪声功率谱密度/(dBm·Hz <sup>-1</sup> )	-174	群体最优值权重 $v$	2

表 3

方案对比

方案	数据分发比例	通信资源	STA 发送功率
基线 1	按链路带宽比例分发	均分	最大功率
基线 2	按链路带宽比例分发	均分	基于时延限制的功率调整
基线 3	按链路带宽比例分发	按用户权重分配	最大功率
基线 4	基于粒子群算法的数据分发	均分	最大功率
所提算法	基于粒子群算法的数据分发	按用户权重分配	基于时间限制的功率调整

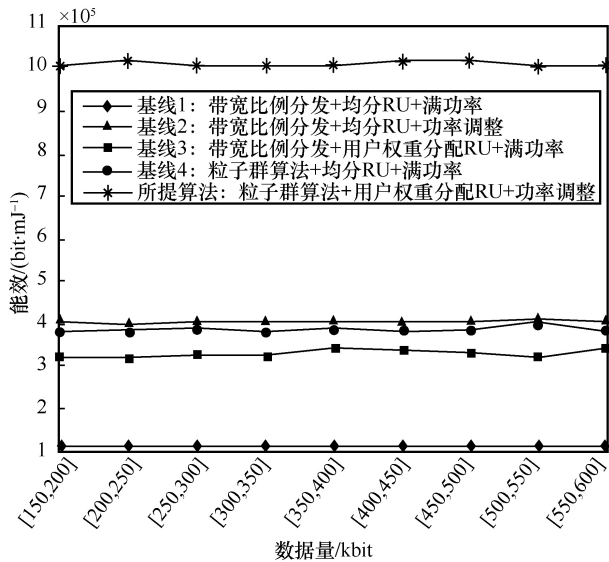


图 9 STA 总能效与传输数据量关系

时限限制内完成数据传输的节点比例与传输数据量关系如图 10 所示,可以看出,随着传输数据量的增加,各方案时限限制内完成数据传输的节点比例逐渐降低。其中,基线 1 与基线 2 下降速度最快,这是因为不合理的数据分发与通信资源分配方案可能会导致待传数据量与传输带宽之间不匹配,使某些节点产生较大的传输时延,无法在时限限制内完成数据传输,且在各 STA 数据量大于 300 kbit 时,数据传输时延已无法满足所有 STA 的时限限制,所以时限限制内完成数据传输的节点的比例降低到 0。同时,基线 1 采用满功率发送数据,基线 2 采用了本文设计的功率调整方案,但由于 STA 功率调整方案是在需要对齐的传输结束时间确定后,通过适当降低 STA 在一些链路上的发送功率,延长传输结束时间实现对齐,目的是提高传输能效,但并不能改善 STA 时延性能,因此,基线 2 与基线 1 的曲线完全重叠。基线 3 与基线 4 分别通过在 RU 分配和数据分发步骤中采用所提算法,在时延性能上相比于基线 1、基线 2 有所改善。所提算法能够根据 STA 的需求进行合理的数据分发与通信资源分配,实现资源的有效利用,有效改善了时延性能。

STA 平均 padding 数据量如图 11 所示,可以看出,随着传输数据量的增加,传输结束时间对齐导致的 padding 数据量增多。其中,基线 1、基线 3、基线 4 中的均采用满功率发送数据,对齐传输结束时间仅采用 padding 的方式,因此 padding 数据量较多。基线 2 和所提算法均采用本文所设计功

率调整方案,通过适当降低 STA 在一些链路上的发送功率,延长传输结束时间实现对齐,但由于 IEEE 802.11 标准中 MCS 速率并非连续值,仅通过降低发送功率无法直接实现结束时间对齐,因此仍需要少量 padding 数据。总体上看,所提算法从数据分发比例、通信资源和 STA 发送功率 3 个角度进行优化,有效降低了传输数据时的 padding 数据量。

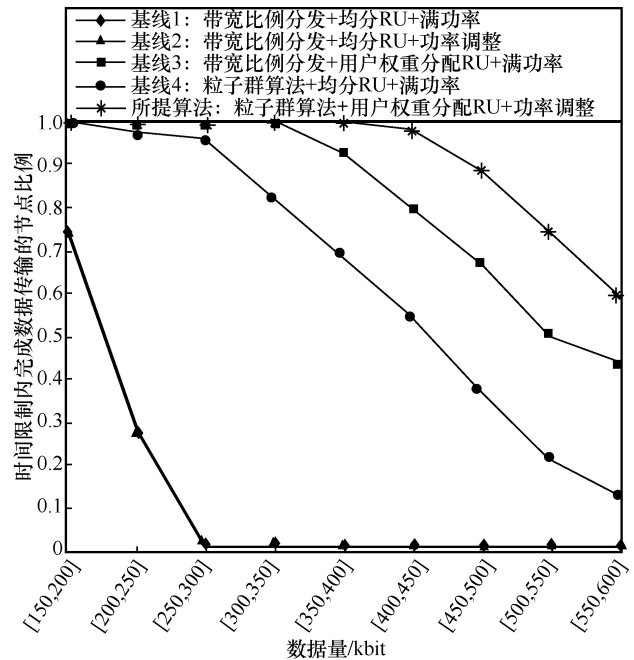


图 10 时限限制内完成数据传输的节点比例与传输数据量关系

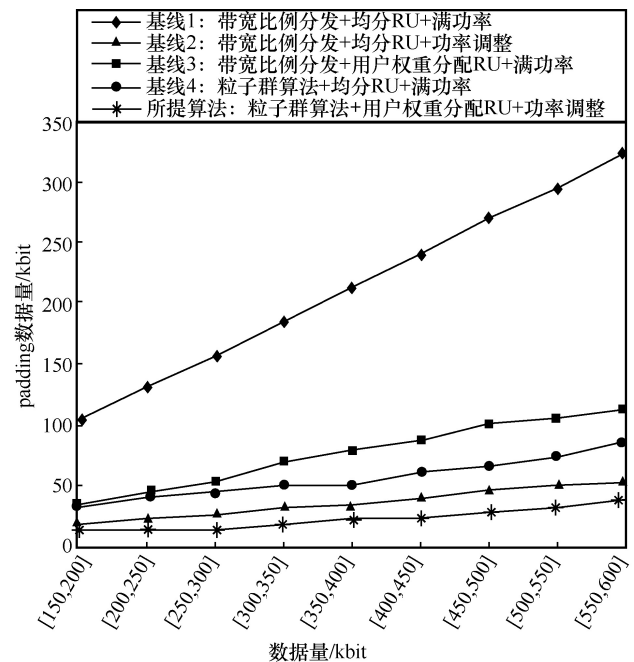


图 11 STA 平均 padding 数据量

能耗效率与迭代次数的关系如图 12 所示,可以看出,随着迭代次数增多,STA 总能效逐渐增大后趋于平稳,当种群数目为 50 时,20 次左右迭代即可实现收敛,且每次收敛时,所得到的 STA 总能效指标也较为稳定,维持在  $1.6 \times 10^6$  bit/mJ 左右。说明所提算法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。粒子群算法搜索出的结果好坏与粒子群算法的种群规模和迭代次数等因素有关<sup>[29-30]</sup>,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。

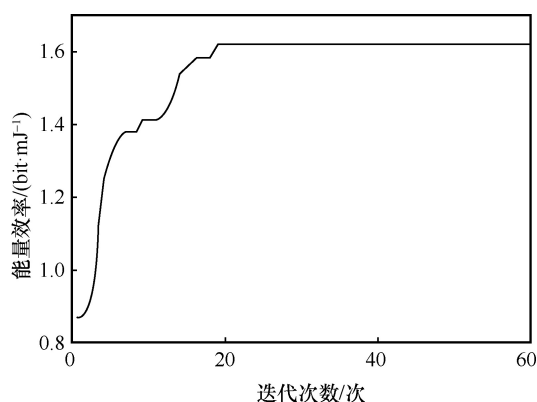


图 12 能耗效率与迭代次数的关系

#### 4 结束语

本文对 Wi-Fi 7 协议中多链路场景联合传输问题进行研究,提出了一种 MLD 高效传输算法。首先,利用粒子群算法决策出各个 MLD STA 在各个开启链路上的数据分发比例。然后,根据数据分发比例,利用权重优先算法决策出各链路的通信资源分配结果。最后,根据 RU 分配结果,计算出能够满足 STA 数据传输时延限制的 STA 最小发送功率。仿真结果表明,所提算法能够通过较低的算法复杂度,显著提高 STA 能效,并且有效改善 STA 传输时延性能。

#### 参考文献:

[1] 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.

[2] YANG M, LI B, YAN Z J, et al. AP coordination and full-duplex enabled multi-band operation for the next generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT)[C]//Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP).

Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.

[3] WILHELMSSON L R, LOPEZ M M, SUNDMAN D. NB-WiFi: IEEE 802.11 and bluetooth low energy combined for efficient support of IoT[C]//Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[4] IEEE. Multi-link power saving discussion: IEEE 802. 11-20/0070r1[S]. 2020.

[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] IEEE. Channel access for multi-link operation: IEEE 802. 11-19/1144r6[S]. 2019.

[7] 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 2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2022: 94-98.

[8] NAIK G, PARK J M, ASHDOWN J, et al. Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: opportunities and challenges[J]. IEEE Access, 2020(8): 153027-153056.

[9] IEEE. Draft standard for Information technology— telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks— specific requirements, wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer (PHY) specifications, amendment 8: enhancements for extremely high throughput (EHT): IEEE P802. 11beTM/D1.2[S]. 2021.

[10] IEEE. MLO asynch qsynch synch: IEEE 802. 11-19/1916r0[S]. 2019.

[11] 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 1: enhancements for high efficiency WLAN: IEEE P802. 11axTM/D5. 1[S]. 2019.

[12] LIU D C, WANG H N, ZHOU G, et al. Arbitrating traffic contention for power saving with multiple PSM clients[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 7030-7043.

[13] BORIS, BELLALTA. AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs[J]. Ad Hoc Networks, 2019, 85: 145-159.

[14] IEEE. MLO: broadcast TWT for MLDs: IEEE 802. 11-21/0394r2[S]. 2021.

[15] JEONG K C, CHOI W S, CHOI S G. A wireless AP power saving algorithm by changing operating mode and altering transmission power in IEEE 802.11 WLAN[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 9-10.

[16] YANG H, DENG D J, CHEN K C. On energy saving in IEEE 802.11ax[J]. IEEE Access, 2018(6): 47546-47556.

- [18] IEEE. EHT power saving considering multi-link: IEEE 802. 11-19/1510r6[S]. 2019.
- [19] FANG L, XUE G T, LYU F, et al. Intelligent large-scale AP control with remarkable energy saving in campus Wi-Fi system[C]//Proceedings of 2018 IEEE 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 69-76.
- [20] IEEE. Multi-link power save-link bitmap: IEEE 802. 11-20/0085r1[S]. 2020.
- [21] XU C, HAN Z Z, ZHAO G F, et al. A sleeping and offloading optimization scheme for energy-efficient WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 877-880.
- [22] CHEN Q H, LIANG G X, WENG Z Q. A target wake time based power conservation scheme for maximizing throughput in IEEE 802.11ax WLANs[C]//Proceedings of 2019 IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 217-224.
- [23] IEEE. MLO: link management—follow up: IEEE 802. 11-19/1904r3[S]. 2020.
- [24] IEEE. Multi-link power save operation: IEEE 802. 11-19/1544r5[S]. 2020.
- [25] IEEE. Multi-link TIM: IEEE 802. 11-20/0066r3[S]. 2020.
- [26] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1942-1948.
- [27] CHEN L. Particle swarm optimization with a novel mutation operator[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). Piscataway: IEEE Press, 2011: 970-973.
- [28] SZCZYPIORSKI K, MAZURCZYK W. Steganography in IEEE 802.11 OFDM symbols[J]. Security and Communication Networks, 2016, 9(2): 118-129.
- [29] 彭喜元, 彭宇, 戴毓丰. 群智能理论及应用[J]. 电子学报, 2003,

31(S1): 1982-1988.

PENG X Y, PENG Y, DAI Y F. Swarm intelligence theory and applications[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(S1): 1982-1988.

- [30] 张俊溪, 张嘉桐, 张玉梅. 一种改进的粒子群优化算法[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 15-20.

ZHANG J X, ZHANG J T, ZHANG Y M. An improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 15-20.

#### [作者简介]



戴林燕(1998-),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Wi-Fi网络MAC层算法。



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。



何蓉(1974-),女,博士,西南交通大学信息科学与技术学院副教授,主要研究方向为通信感知计算一体化网络、Wi-Fi网络、无线资源分配等。