

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250277.

专题:面向6G的无线光通信

任智,叶太林,张平喜,等. 基于混合天线的太赫兹无线局域网MAC协议[J]. 光通信研究, 2026(2): 250277.

Ren Z, Ye T L, Zhang P X, et al. MAC Protocol for Terahertz WLANs based on Hybrid Antenna[J]. Study on Optical Communications, 2026(2):250277.

## 基于混合天线的太赫兹无线局域网 MAC 协议

任智,叶太林,张平喜,陈虹林

(重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065)

**摘要:**【目的】太赫兹无线局域网(WLAN)在现代通信中具有突出价值,但其性能提升长期受限于介质访问控制(MAC)协议设计。为了解决大规模场景下现有太赫兹 WLAN 网络协议中存在的信道时间分配时段(CTAP)波束训练控制开销大以及竞争接入时段(CAP)由于节点数量过多导致的入网及时隙申请帧易碰撞等问题,文章提出了一种基于混合天线的太赫兹 WLAN MAC 协议(HA-MAC)。【方法】文章所提协议首先根据节点设备(DEV)与微微网协调器(PNC)之间的距离对 DEV 进行分级,为该协议后续机制奠定基础;其次,通过基于混合天线的多节点分级冲突避免机制,不同 DEV 按级别分配相应天线模式执行入网和时隙申请,并利用全向天线模式实现监听退避机制,以降低 CAP 的帧碰撞率;最后,设计了基于混合天线的快速波束赋形机制,使节点按源或目的 DEV 级别采用不同天线模式进行波束赋形,以减少波束赋形训练的控制开销。【结果】基于 VRNET 软件的仿真验证表明,HA-MAC 在网络吞吐量、数据平均时延和波束赋形控制开销等关键性能指标上与现有 MAC 协议相比均有一定的优化。【结论】由仿真结果可知,文章所提协议可行,且能有效提高太赫兹 WLAN 的网络性能,并对未来大规模场景的局域网环境具有实际应用价值。

**关键词:**太赫兹无线局域网;介质访问控制协议;监听退避;波束赋形

中图分类号:TN929

文献标志码:A

### MAC Protocol for Terahertz WLANs based on Hybrid Antenna

REN Zhi, YE Tailin, ZHANG Pingxi, CHEN Honglin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** 【Objective】Terahertz Wireless Local Area Networks (WLAN) hold prominent value in modern communications, but their performance improvement has been constrained by the design of Medium Access Control (MAC) protocols. To address the issues existing in current terahertz WLAN protocols under large-scale scenarios, such as high control overhead of beam training in the Channel Time Allocation Period (CTAP) and frequent collisions of network access and time slot request frames in the Contention Access Period (CAP) due to excessive node counts, this paper proposes a Hybrid Antenna-based MAC Protocol for Terahertz WLAN(HA-MAC). 【Methods】The protocol first classifies Device (DEV) nodes based on their distance from the PicoNet Coordinator (PNC), laying the foundation for subsequent mechanisms of the protocol. Secondly, through a hybrid antenna-based multi-node hierarchical collision avoidance mechanism, different DEVs are assigned corresponding antenna modes (omnidirectional or directional) according to their levels to perform network access and time slot application operations. Meanwhile, the omnidirectional antenna mode is utilized to implement a listening and backoff mechanism, aiming to reduce the frame collision rate in the CAP. Finally, a hybrid antenna-based fast beamforming mechanism is designed, enabling nodes to adopt different antenna modes for beamforming according to the levels of source or destination DEVs, thereby reducing the control overhead of beamforming training. 【Results】The simulation results based on VRNET software shows that HA-MAC achieves certain optimizations in key performance indicators such as network throughput, average data delay, and beamforming control overhead compared with existing MAC protocols. 【Conclusion】The simulation results indicate that the proposed protocol is feasible and can effectively improve the network performance of terahertz WLAN, showing practical application value for future large-scale local area network environments.

**Key words:** terahertz WLAN; MAC protocols; monitoring and retreating; beam formation

## 0 引言

随着第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Networks, 6G)时代的到来,太赫兹频段凭借超

大带宽和超高传输速率成为突破通信容量瓶颈的关键技术方向<sup>[1]</sup>,其介质访问控制(Media Access Control, MAC)协议研究多基于电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers,

收稿日期:2025-08-12; 修回日期:2025-08-22; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61971080)

作者简介:任智(1971-),男,四川内江人。教授,博士,主要研究方向为太赫兹局域网 MAC 协议。

通信作者:叶太林,硕士。E-mail:429141795@qq.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

IEEE)802.15.3c 标准,因结构简单且支持 Gbit/s 级以上高速传输,成为太赫兹无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)研究的主要基础;在第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Networks, 5G)/6G 通信环境下,智能天线选择与波束成形技术备受关注<sup>[2]</sup>,但存在以下问题:全向天线覆盖广却受通信距离限制,定向天线能提升传输距离与抗干扰能力却大幅增加邻居发现复杂度<sup>[3]</sup>,单一天线模式难以平衡覆盖效率与传输性能,这是亟待解决的核心矛盾。

IEEE 802.15.3c 制定了标准超帧结构<sup>[4]</sup>,节点设备(Device, DEV)在每一个超帧的竞争接入时段(Contention Access Period, CAP)完成入网资源申请,并在申请完成后下一超帧的信道时间分配时段(Channel Time Allocation Period, CTAP)传输数据。然而现有研究仍存在不足:一种自适应的定向 MAC(An Adaptive Directional MAC, AD-MAC)协议<sup>[5]</sup>的反向监听偏移重发机制未考虑定向监听的方向性局限,无法覆盖其他扇区;多优先级的自适应太赫兹无线局域网定向 MAC(Priority-based Adaptive Time Slot Request MAC, PA-MAC)协议<sup>[6]</sup>的优先级划分与自适应时隙申请机制未解决监听覆盖范围问题;低延迟低开销太赫兹无线局域网定向 MAC(Low Delay and Low Overhead Terahertz Wireless Personal Area Networks Directional MAC Protocols, LDLO-MAC)协议<sup>[7]</sup>和一种适用于无线局域网的高效低时延太赫兹 MAC(High Efficiency and Low Latency Terahertz MAC, HELL-MAC)协议<sup>[8]</sup>的波束成形机制未充分考虑节点移动场景;一种移动感知的太赫兹无线局域网定向 MAC(Mobility-Aware Directional MAC, MA-MAC)协议<sup>[9]</sup>的扇区预测算法虽兼顾移动节点,但仍存在不确定性。

综上,现有太赫兹 WLAN MAC 协议在 CAP

存在请求帧碰撞和 CTAP 波束赋形开销过高等问题。因此,本文提出了一种基于混合天线的太赫兹 WLAN MAC 协议(Hybrid Antenna-based MAC Protocol for Terahertz WLANs, HA-MAC)。

## 1 网络模型与问题描述

### 1.1 网络模型

本文所设计的太赫兹 WLAN 网络模型如图 1 所示,由多个 DEV 和 1 个微微网协调器(PicoNet Coordinator, PNC)构成。在网络中,DEV 可与 PNC 直接通信;PNC 则负责管理 DEV 入网、分配时隙资源以及协助源 DEV 与目的 DEV 完成信息交互。

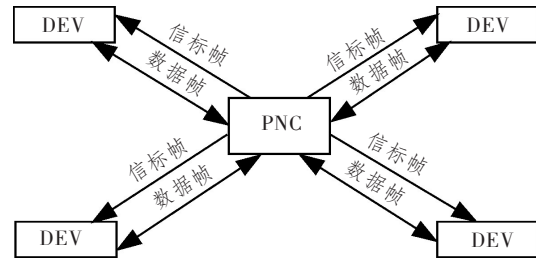


图 1 太赫兹 WLAN 网络模型

Figure 1 Terahertz WLAN model

太赫兹 WLAN 从时间上被划分为多个超帧,其结构如图 2 所示(图中  $m$  为超帧序号,代表相邻的超帧序列)。每个超帧包含 3 个时段:信标时段(Beacon Period, BP)、CAP 和 CTAP。在 BP, PNC 向各扇区定向广播 Beacon 帧,各扇区 DEV 旋转接收(图中  $n$  为扇区总数)。CAP 分为关联竞争接入子时段(Association Sub-Contention Access Period, Association S-CAP)和常规竞争接入子时段(Regular Sub-Contention Access Period, Regular S-CAP)(图中  $i$  和  $j$  为该子时段的定向接入方向数):前者供 DEV 完成入网;后者供已入网 DEV 申请时隙资源。CTAP 用于成功申请时隙的节点进行数据传输。

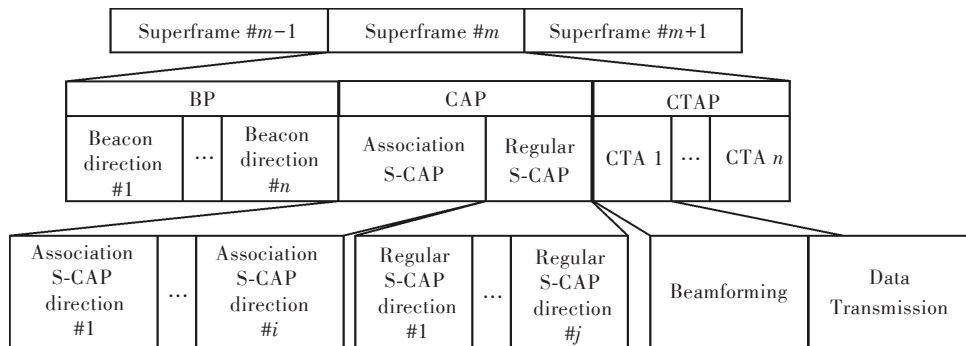


图 2 超帧结构图

Figure 2 Superframe structure

### 1.2 问题描述

依据 IEEE 802.15.3c 标准,在现有太赫兹 WLAN 运行过程中存在以下问题:

①在 CAP,若同一扇区内有多个 DEV 发起入网或时隙申请,请求帧极易发生碰撞。这会导致 DEV 无法及时完成入网或时隙申请,最终造成吞吐量下降和网络平均时延增大等问题。

②在 CTAP,PNC 与 DEV 在数据传输前需要通过旋转天线发送波束赋形训练帧以实现波束对准。这种方式不仅产生了额外的控制开销,还因波束对准耗时过长而增加了网络平均时延并缩短了数据传输时间,从而降低了网络吞吐量。

## 2 MAC 协议优化

为解决上述问题,本文提出了 HA-MAC,该协议创新设计了 3 种机制,分别为基于 PNC 与 DEV 距离的节点分级机制、基于混合天线的多节点分级冲突避免机制以及基于混合天线的快速波束赋形机制。

### 2.1 基于 PNC 与 DEV 距离的节点分级机制

本文提出了一种基于 PNC 与 DEV 距离的节点分级机制:在 BP,DEV 接收 Beacon 帧时,采用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)机制测得节点与 PNC 的距离  $D$ ;在 CAP,PNC 接收 DEV 的请求帧时,同样通过 RSSI 机制测得与各个 DEV 的距离  $D_x(x$  为 DEV 的唯一标识)。

该机制如图 3 所示,依据不同天线组合的最大通信距离  $D_M$  与  $D$  的对比关系划分 DEV 的层级。

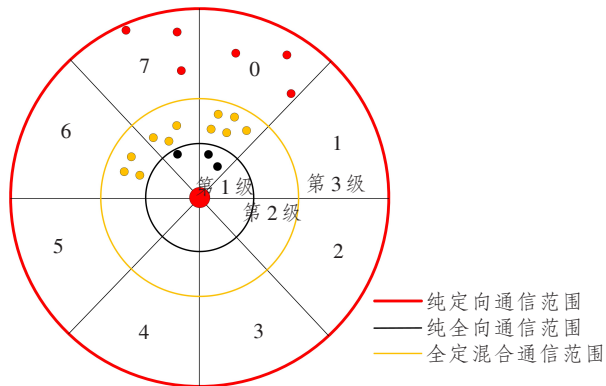


图 3 DEV 分级示意图

Figure 3 Schematic diagram of DEV grading

$D_{OO}$  为全向发送-全向接收模式的通信阈值; $D_{DO}$  为定向发送-全向接收模式的阈值; $D_{OD}$  为全向发送-定向接收模式的阈值; $D_{DD}$  为定向发送-

定向接收模式的阈值。当  $D < D_{OO}$  时,判定 DEV 级别  $L=1$ ;当  $D_{OO} \leq D < D_{DO}$  或  $D_{OD}$  时,则判定  $L=2$ ;若  $D_{DO}$  或  $D_{OD} < D \leq D_{DD}$ , 则判定  $L=3$ 。

为了减少节点移动性和环境的影响,在每次控制信息交互时,DEV 和 PNC 会根据最新的 RSSI 机制测量结果,按照更新的间隔和节点移动速度来更新  $D$  和  $D_x$ ,并重新判定  $L$ 。

通过该机制,DEV 可确定自身所属级别  $L$ ,PNC 可建立一份关于 DEV 地址及其对应级别  $L_x$  的映射表。

### 2.2 基于混合天线的多节点分级冲突避免机制

针对 1.2 节中的问题①,本文提出了基于混合天线的多节点分级冲突避免机制。首先,PNC 在 BP 采用定向天线按扇区发送 Beacon 帧时,会将该扇区的 3 级 Association S-CAP 与 3 级 Regular S-CAP 起始时间(分别为 A-CAP 和 R-CAP)放入 beacon 帧,其帧格式如图 4 所示。



图 4 新型 Beacon 帧结构

Figure 4 New Beacon frame structure

DEV 接收 Beacon 帧后更新时间同步信息。随后进入 CAP,若尚未完成入网,则在 Association S-CAP 发送入网申请帧;若已入网且存在发包需求,则在 Regular S-CAP 发送时隙申请帧。

根据  $D$  和  $D_M$  将 DEV 所处级别总申请时间划分为  $n$  个连续且不重叠的区间,初始申请时间  $T_s$  的计算表达式为

$$T_s = T_b + \left[ \frac{D_M - D}{D_M} n \right] \frac{T_1}{n} + \frac{U(0, T_1)}{n}, \quad (1)$$

式中: $T_1 = T_e - T_b$ ,  $T_b$  和  $T_e$  分别为该级别申请时间的起点和终点; $T_s$  与  $D$  相关:在同级 DEV 中,距离 PNC 越远,即  $D$  越大,  $T_s$  越靠前;距离越近,即  $D$  越小,  $T_s$  则越靠后。

发包前,DEV 通过全向天线监听。若监测到其他请求帧,先计算当前时间  $T_c$  与  $T_s$  的差值  $\Delta T = T_s - T_c$ ,再判断  $\Delta T$  是否足以完成请求帧信息交互(所需时间记为  $T_{req}$ )。

若  $\Delta T < T_{req}$ ,则进一步判断  $T_c + T_{req}$  是否小于

当前级别 CAP 结束时间  $T_{\text{end}}$ :若  $T_c + T_{\text{req}} < T_{\text{end}}$ ,则退避至  $T_c + T_{\text{req}}$  再次发送请求帧;反之,若  $T_c + T_{\text{req}} \geq T_{\text{end}}$ ,则无法执行退避操作,需在下一超帧重新发送请求帧。

在上述过程中,监听时若仍监测到其他请求帧,需重复执行上述判断与退避操作;反之,则在监听结束时立即切换为定向天线模式,向 PNC 定向发送申请帧。

### 2.3 基于混合天线的快速波束赋形机制

根据 2.1 节所述机制,DEV 可确定自身级别  $L$ ,PNC 则建立了 DEV 地址与级别对应表。针对 1.2 节中的问题②,本文提出了一种基于混合天线的快速波束赋形机制,在 CTAP,源 DEV 时隙到来时,源 DEV 和 PNC 分别查找到源 DEV 级别  $L_{\text{srcDEV}}$ 。根据  $L_{\text{srcDEV}}$ ,双方分别执行相应操作:

若  $L_{\text{srcDEV}} = 1$ ,源 DEV 以全向天线发送 1 次训练帧;PNC 同样以全向天线等待接收。

若  $L_{\text{srcDEV}} = 2$ ,源 DEV 以全向天线按最小波束赋形间隔  $T_{\text{min}}$  发送扇区数量  $S$  次训练帧;PNC 定向旋转接收。

若  $L_{\text{srcDEV}} = 3$ ,源 DEV 以定向天线在各扇区按  $T_{\text{min}}$  间隔发送  $S$  次训练帧,若存在历史波束赋形信息,则优先向原方向一侧发送训练帧;PNC 定向旋转接收。

当 PNC 的时隙到来时,PNC 和目的 DEV 分别查找到目的 DEV 级别  $L_{\text{dstDEV}}$ 。根据  $L_{\text{dstDEV}}$  的值,双方分别执行相应操作:

若  $L_{\text{dstDEV}} = 1$ ,PNC 以全向天线发送 1 次训练帧;目的 DEV 以全向天线等待接收。

若  $L_{\text{dstDEV}} = 2$ ,PNC 以全向天线按  $T_{\text{min}}$  间隔发送  $S$  次训练帧;目的 DEV 定向旋转接收。

若  $L_{\text{dstDEV}} = 3$ ,PNC 以定向天线在各扇区按  $T_{\text{min}}$  间隔发送  $S$  次训练帧,若存在历史波束赋形信息,则优先向原方向一侧发送训练帧;目的 DEV 定向旋转接收。

由于节点移动性有可能使其实际级别  $L$  发生改变但所记录的  $L_{\text{srcDEV}}$  和  $L_{\text{dstDEV}}$  没有更新,导致波束赋形失败,为了解决该问题,当  $L_{\text{srcDEV}} = 1$  或  $L_{\text{dstDEV}} = 1$  时,在  $T_{\text{min}}$  之后,若波束赋形未成功,则  $L_{\text{srcDEV}}$  或  $L_{\text{dstDEV}}$  更新为 2;当  $L_{\text{srcDEV}} = 2$  或  $L_{\text{dstDEV}} = 2$  时,在发送  $N$  次训练帧后,若波束赋形未成功,则  $L_{\text{srcDEV}}$  或  $L_{\text{dstDEV}}$  更新为 3。在更新级别完毕后,基于更新后的级别重新进行波束赋形。

## 3 性能分析

本文采用基于 IEEE 802.15.3c 的太赫兹 WLAN 定向 MAC 协议(后文简称 IEEE 802.15.3c)、AD-MAC 协议和 LDLO-MAC 协议作为比较对象,对本文所提方法带来的性能改善进行理论分析验证。

**引理 1** 相较于 IEEE 802.15.3c 和 AD-MAC 协议,本文所提 HA-MAC 发送请求帧时的碰撞概率更低。

证明:依据 IEEE 802.15.3c,DEV 入网或时隙申请的流程为,在接收到 Beacon 后,在对应 CAP 向 PNC 发送申请帧,并定时。若在定时有效期内收到 PNC 回复,DEV 便完成申请;超时则执行退避,子时段结束退避至下一对应时段。设  $p_1 = 1/S$ ,则在该协议中,DEV 在发送请求帧时的碰撞概率  $p_2$  为

$$p_2 = p_1 + \sum_{k=3}^{n+1} C_k^2 p_1^{k-1}, \quad (2)$$

式中,  $C_k^2 p_1^{k-1}$  为存在  $k$  个 DEV 发送请求帧,其中至少有两个 DEV 在同一扇区的概率。

AD-MAC 协议在 IEEE 802.15.3c 协议的基础上将扇区又划分为  $q$  段( $q \geq 2$ ),且采用反向监听机制,设  $p_3 = 1/(qS)$ ,  $p_4 = 1 - 1/S$ ,则在 AD-MAC 协议中,DEV 在发送请求帧时的碰撞概率  $p_5$  为

$$p_5 = p_3 p_4 + \sum_{k=3}^{n+1} C_k^2 p_3^{k-1} p_4. \quad (3)$$

而 HA-MAC 将每个扇区按照不同通信范围分为 3 级,又在此基础上根据距离将每级初始发送请求帧时间分为  $n$  段( $n \geq 2$ ),且采用全向监听机制,设  $p_6 = 1/(3nS)$ ,  $p_7 = 1/2$ ,则在 HA-MAC 中,DEV 在发送请求帧时的碰撞概率  $p_8$  为

$$p_8 = p_6 p_7 + \sum_{m=3}^{n+1} C_m^2 p_6^{m-1} p_7. \quad (4)$$

则由式(2)、式(3)和式(4)可知,  $p_1 > p_3 > p_6$ ,  $1 > p_4 > p_7$ ,得  $p_2 > p_5 > p_8$ ,故 HA-MAC 较前两种协议能有效降低发送请求帧时的碰撞概率。

**引理 2** 相较于 IEEE 802.15.3c 和 LDLO-MAC 协议,本文所提 HA-MAC 所需的波束赋形训练开销更小。

证明:设网络场景中有  $N$  个节点,每个节点有  $S$  个扇区,波束赋形训练帧和回复帧大小分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ ,IEEE 802.15.3c 协议、LDLO-MAC 协议和 HA-MAC 下源节点发送训练帧的个数分别为  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_3$ 。

IEEE 802.15.3c 协议、LDLO-MAC 协议以及 HA-MAC 在网络中的波束赋形训练开销  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  分别为

$$C_1 = (X_1 \epsilon_1 + \epsilon_2) N, \quad (5)$$

$$C_2 = (X_2 \epsilon_1 + \epsilon_2) N, \quad (6)$$

$$C_3 = (X_3 \epsilon_1 + \epsilon_2) N. \quad (7)$$

在 IEEE 802.15.3c 协议中,波束赋形时,源节点在各扇区发送  $S$  个训练帧,发送最大训练帧数量为  $S^2$ ,其平均发送训练帧数量  $E(X_1)$  为

$$E(X_1) = \frac{1+S^2}{2}. \quad (8)$$

而在 LDLO-MAC 协议中,采用自适应半波束形成机制,根据历史信息,优先扫描一侧扇区,发送最大训练帧数量为  $S^2/2$ ,其平均发送训练帧数量  $E(X_2)$  为

$$E(X_2) = \frac{2+S^2}{4}. \quad (9)$$

在 HA-MAC 中,设网络中存在  $N_1$  个第 1 级节点、 $N_2$  个第 2 级节点和  $N_3$  个第 3 级节点,并且  $N_1 + N_2 + N_3 = N$ ,源 DEV 或者目的 DEV 处于第 1 级时,只发送 1 次波束赋形训练帧;处于第 2 级时,最多发送  $S$  次波束赋形训练帧;处于第 3 级时,最多发送训练帧数量为  $S^2/2$ ;其平均发送波束赋形训练帧数量  $E(X_3)$  为

$$E(X_3) = \frac{N_1}{N} + \frac{(1+S)N_2}{2N} + \frac{(2+S^2)N_3}{4N}. \quad (10)$$

由于扇区数量  $S \geq 2$ ,则  $E(X_1) > E(X_2) \geq E(X_3)$ ,因此,HA-MAC 相较于 IEEE 802.15.3c 和 LDLO-MAC 协议,所需的波束赋形训练开销更小,即

$$C_1 \geq C_2 \geq C_3. \quad (11)$$

## 4 仿真分析

本文利用 VRNET Developer 仿真软件结合 C++ 语言,对 IEEE 802.15.3c、AD-MAC 协议、LDLO-MAC 协议及本文所提 HA-MAC 开展了仿真验证。主要仿真参数设置如表 1 所示。

在本文中,选择网络吞吐量、网络平均时延以及波束赋形控制开销作为核心的性能指标,通过仿真实验收集这些指标数据,并对其进行深入地对比分析。

表 1 仿真参数设置

仿真参数/单位	设置值
网络覆盖面积	150 m×150 m
节点通信距离/m	100
节点数量/个	(4, 8, 16, 32, 64)
载波频率/GHz	140
带宽/GHz	3
数据包产生间隔/ms	2.5
数据传输速率/Gbit/s	15
数据帧长度/Byte	65 536
移动模型	随机移动
仿真时间/s	30

### 4.1 网络吞吐量

由图 5 可知,随着节点数量的增加,HA-MAC 的吞吐量高于 LDLO-MAC、AD-MAC 和 IEEE 802.15.3c 协议,最高可分别提升 2.313%、12.776% 和 18.113%。这源于 HA-MAC 的多节点冲突避免机制,使得在网络场景中节点规模越大,相较于其他协议,DEV 在 CAP 更易成功申请到间隙;同时,其快速波束赋形机制缩短了 CTAP 的波束赋形训练耗时,延长了数据传输时长,从而提升了时隙利用率,最终使网络整体吞吐量明显增加。

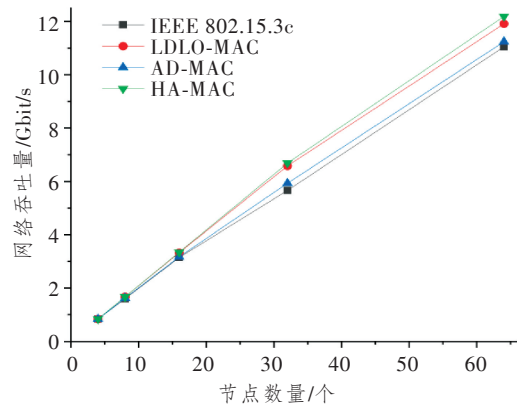


图 5 网络吞吐量

Figure 5 Network throughput

### 4.2 网络平均时延

如图 6 所示,网络平均时延随着节点数量的增加而上升,而 HA-MAC 相较于 LDLO-MAC、AD-MAC 和 IEEE 802.15.3c 协议,在时延优化上效果明显,最高降幅分别达到了 79.37%、69.45% 和 72.63%。尤其是在大规模场景下,HA-MAC 通过多节点冲突避免机制降低了 CAP 时隙申请碰撞概率;又通过快速波束赋形机制,缩短了 CTAP 的波束赋形训练时间,从而使得数据包生成后能够及时

发送到目的 DEV,从而有效降低了网络平均时延。

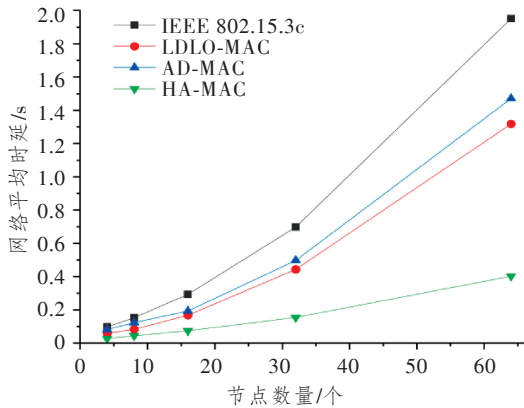


图6 网络平均时延

Figure 6 Average network delay

#### 4.3 波束赋形控制开销

如图7所示,随着节点数量的增多,波束赋形控制开销随之增加,而HA-MAC在该指标上的优势明显:相较于LDLO-MAC、AD-MAC和IEEE 802.15.3c协议,其波束赋形控制开销最高分别降低了21.02%、50.85%和61.58%。主要原因在于:在CTAP,HA-MAC通过快速波束赋形机制,仅需发送更少的训练帧即可完成波束赋形,进而有效降低了波束赋形控制开销。这一仿真结果与引理2的结论一致,也印证了HA-MAC在控制开销优化上的有效性。

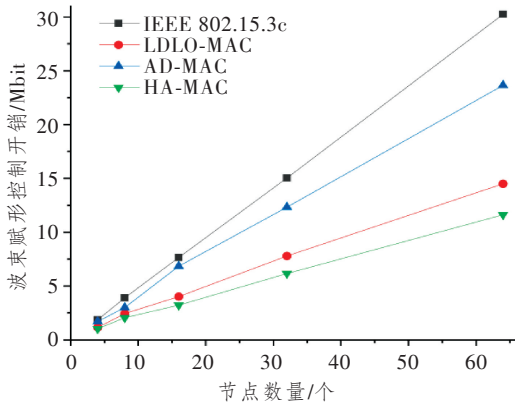


图7 波束赋形控制开销

Figure 7 Beamforming control overhead

## 5 结束语

本文针对现有太赫兹 WLAN MAC 协议存在的两类关键问题:CAP 多节点处于相同扇区时入网及时隙申请困难以及 CTAP 波束训练开销偏大,提出了 HA-MAC,通过多节点分级冲突避免机制,使节点申请在 CAP 可有效规避碰撞,同时在 CTAP 各节点依据源或目的 DEV 级别使用对应天线模式

进行波束赋形,从而实现了快速波束赋形,优化了网络性能。仿真对比结果显示,HA-MAC 相较于传统太赫兹 MAC 协议,尤其是在大规模场景下,能够更有效地提高网络吞吐量、降低网络平均时延以及减少波束赋形控制开销。

#### 参考文献:

- [1] 许宁生,余建军,迟楠,等. 太赫兹通信和可见光通信技术发展状况与核心器件研究前沿[J]. 中国科学(信息科学), 2025, 55(4): 711-748.  
Xu N S, Yu J J, Chi N, et al. Terahertz and Visible Light Communication: Progress, Frontiers, and Challenges[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2025, 55(4): 711-748.
- [2] 严健. 5G网络中的智能天线选择与波束成形技术探究[J]. 通信与信息技术, 2024(5): 5-8.  
Yan J. Research on Smart Antenna Selection and Beamforming Technology in 5G Networks[J]. Communication & Information Technology, 2024(5): 5-8.
- [3] 余彪,张子东,刘玉涛,等. 基于宽窄波束变换的定向邻居发现算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 283-289.  
Yu B, Zhang Z D, Liu Y T, et al. Research on Directional Neighbor Discovery Algorithm based on Wide-Narrow Beamforming Transformation [J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(9): 283-289.
- [4] IEEE 802.15.3c-2009, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension[S]. New York, USA: IEEE, 2009.
- [5] 任智,吕昱辉,徐兆坤,等. 一种自适应的太赫兹无线个域网高效定向MAC协议[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 99-106.  
Ren Z, Lü Y H, Xu Z K, et al. An Adaptive Directional MAC Protocol for Terahertz Wireless Personal Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(1): 99-106.
- [6] 任智,张伟业,祁君易,等. 一种多优先级的自适应太赫兹无线局域网定向MAC协议[J]. 电讯技术, 2025, 65(10): 1650-1656.  
Ren Z, Zhang W Y, Qi J Y, et al. A Multi-Priority Adaptive Terahertz Directional MAC Protocol for Wireless LANs[J]. Telecommunication Engineering, 2025,

- 65(10): 1650–1656.
- [7] Su X, Wu B Y, Guo L, et al. Low Delay and Low Overhead Terahertz Wireless Personal Area Networks Directional MAC Protocols[C]//2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Xi'an, China: IEEE, 2021: 9408779.
- [8] 刘奕君, 任智, 李维政. 太赫兹无线局域网MAC协议优化设计[J]. 电讯技术, 2023, 63(3): 375–381.
- Liu Y J, Ren Z, Li W Z. Optimal Design of MAC Protocols for Terahertz Wireless Local Area Networks[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(3): 375–381.
- [9] 任智, 陈春宇, 古金东, 等. 一种移动感知的太赫兹无线局域网定向MAC协议[J]. 电讯技术, 2024, 64(5): 725–731.
- Ren Z, Chen C Y, Gu J D, et al. A Mobility-Aware Directional MAC Protocol for Terahertz WLANs [J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64(5): 725–731.