

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240179.

专题:面向6G的无线光通信

祁君易,任智,张伟业,等. 低时延高可靠的多PAN太赫兹无线个域网MAC协议[J]. 光通信研究, 2026(2): 240179.

Qi J Y, Ren Z, Zhang W Y, et al. Low Latency and High Reliability Multi-PAN Terahertz Wireless Personal Area Networks MAC Protocol [J]. Study on Optical Communications, 2026(2): 240179.

低时延高可靠的多 PAN 太赫兹无线个域网 MAC 协议

祁君易^{a,b}, 任智^{a,b}, 张伟业^{a,b}, 杨建军^{a,b}

(重庆邮电大学 a. 通信与信息工程学院; b. 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要:【目的】为了解决现有分布式太赫兹无线个域网(WPAN)协议中存在的跨个域网(PAN)数据传输时延较大和边缘节点传输干扰的解决方案在常规信道时间分配时段(N-CTAP)存在资源分配不均衡和节点状态汇报机制不完善的问题,文章提出了一种低时延高可靠的多 PAN 太赫兹 WPAN 介质访问控制(MAC)协议——LLHR-MAC。【方法】文章所提协议首先对现有太赫兹 WPAN 协调超帧结构进行优化,该方法通过降低网桥节点为转发数据申请时隙的等待时间,进而减少跨 PAN 数据传输接入时延;然后对现有边缘节点时隙分配机制进行改进来解决多 PAN 数量情况下的时隙分配 N-CTAP 时段资源浪费问题;最后,提出节点通过利用空闲的信标帧队列时段(BAP)资源向微微网协调器(PNC)汇报自身状态信息来解决由于节点状态变化 PNC 节点未能及时正确分配可靠时隙资源的问题。【结果】通过使用 OPNET 软件进行仿真模拟,验证了 LLHR-MAC 协议在传输成功率、数据帧平均接入时延、MAC 层吞吐量和时隙利用率指标上与现有协议相比均有一定提升。【结论】由仿真结果可知,文章所提协议可有效提高多 PAN 太赫兹无线网络的网络性能,并对未来针对更多数量 PAN 环境下的网络性能优化具有实际意义。

关键词:太赫兹;个域网;协调超帧;边缘节点;节点状态

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A

Low Latency and High Reliability Multi-PAN Terahertz Wireless Personal Area Networks MAC Protocol

QI Junyi^{a,b}, REN Zhi^{a,b}, ZHANG Weiye^{a,b}, YANG Jianjun^{a,b}

(a. School of Communication and Information Engineering; b. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: 【Objective】To address the problems that the existing solutions for high cross-Personal Area Network (PAN) data transmission latency and edge node transmission interference in distributed terahertz Wireless Personal Area Network (WPAN) protocols suffer from unbalanced resource allocation and inadequate node status reporting mechanism during the Normal Channel Time Allocation Period (N-CTAP), this paper proposes a low-latency and high-reliability multi-PAN terahertz WPAN Medium Access Control (MAC) protocol, LLHR-MAC. 【Methods】This protocol first optimizes the coordinated superframe structure of existing terahertz WPAN. This method reduces the waiting time for bridge nodes to apply for time slots for forwarding data, thereby reducing the cross PAN data transmission access delay. Then, the existing edge node slot allocation mechanism is improved to solve the slot allocation problem in the case of multiple PAN quantities and the waste of N-CTAP slot resources. Finally, it is proposed that nodes report their own status information to the Piconet Coordinator (PNC) by utilizing the resources of the idle Beacon Alignment Period (BAP), so as to solve the problem that the PNC fails to allocate reliable time slot resources timely and accurately due to the change of node status. 【Results】By using OPNET software for simulation, it was verified that the LLHR-MAC protocol has certain improvements in transmission success rate, average access delay of data frames, MAC layer throughput, and time slot utilization compared to existing protocols. 【Conclusion】According to the simulation results, the protocol proposed in this paper can significantly enhance the network performance of multi-PAN terahertz wireless networks. It also has practical significance for the optimization of network performance in environments with a larger number of personal area networks in the future.

Key words: terahertz; PAN; coordinate superframe; edge node; node status

0 引言

随着第六代移动通信网络(6th Generation Mobile Networks, 6G)时代的到来,现有网络已无法提

供足够的带宽资源来满足人们日益增长的需求,太赫兹网络得益于其丰富的频谱资源,成为前沿通信领域的研究焦点^[1]。行业专家们希望在现有电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics

收稿日期:2024-08-16; 修回日期:2024-09-12; 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:祁君易(2000-),男,河南汝州人。硕士,主要研究方向为分布式多 PAN 太赫兹无线个域网 MAC 协议。

通信作者:祁君易,硕士。E-mail:1870464081@qq.com

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

Engineers, IEEE) 802. 15. 3 协议上对多个太赫兹无线个域网^[2] (Wireless Personal Area Network, WPAN) 进行优化来提高整个网络的通信距离与网络性能。

为解决节点业务量变化所造成的时隙分配资源与实际负载不匹配的问题,文献[3]提出了一种动态调整子微微网的私有信道时间分配(Channel Time Allocation, CTA)机制,但该机制在网络初始化阶段的效果并不理想;针对竞争接入时段(Contention Access Period, CAP)时隙利用率较低的问题,文献[4]提出了机会性的 CAP 复用机制,微微网协调器(Piconet Coordinator, PNC)根据网络当前节点数来选择不同的超帧结构提高利用率。

为解决多个域网(Personal Area Network, PAN)太赫兹网络中存在的子网形成后无节点加入造成私有 CTA 浪费的问题,文献[5]提出了一种基于广播侦听方式的子微微网创建机制;针对两个太赫兹网络中超帧协调过程较慢和节点的负载均衡问题,文献[6]提出网桥节点对不同网络内剩余时隙数判断后再向高余量的 PNC 申请时隙,但该介质访问控制(Media Access Control, MAC)协议只实现了部分时段的负载均衡并仍存在网间干扰问题。

出于目前拓展太赫兹多 PAN 通信距离的需求,文献[7]提出了一种多微微网通信范围扩展的解决方案,但存在网桥节点收到跨 PAN 数据包后再进行时隙申请时等待时间较长的问题;针对两个太赫兹 WPAN 中存在边缘节点的干扰问题,文献[8]提出将节点与网内数据传输过程进行分类,但存在节点状态汇报不及时和信道资源的浪费问题。

针对双 PAN 太赫兹网络中存在错误信息汇报慢的问题,文献[9]提出了一种边缘节点信息的高效汇报方法,但该方法并未解决干扰出现的根本问题;针对太赫兹网络中跨 PAN 数据传输分配不均衡的问题,文献[10]提出 PNC 将下一超帧申请时隙信息添加到信道回复消息中发送给普通节点(Device, DEV), DEV 收到后向 PNC 汇报自身状态,但若节点自身状态变化后没有时隙需求,则 PNC 就无法获取该节点的最新状态信息。

上述现有工作中存在跨 PAN 数据时延较大、边缘节点解决方案造成时隙资源的浪费以及节点状态汇报不及时的问题,因此本文提出了一种低时延高可靠的多 PAN 太赫兹 WPAN MAC 协议(Low Latency and High Reliability MAC Protocol for Multi-PAN Terahertz WPAN, LLHR-MAC)。

1 分布式多 PAN 太赫兹无线网络模型与超帧结构

以 3 个太赫兹 WPAN 为例,按照结构分为线型与环型,如图 1 所示,每个 PAN 内由 1 个 PNC 和多个 DEV 组成,其中 PNC 作为整个网络的核心,负责协调网络内的各项通信活动及资源分配,DEV 为网络中的普通节点单元。不同 PAN 重叠区域内的节点称为网桥节点,该节点主要负责多 PAN 太赫兹无线网络的协调和同步功能以及跨 PAN 数据传输业务的转发。

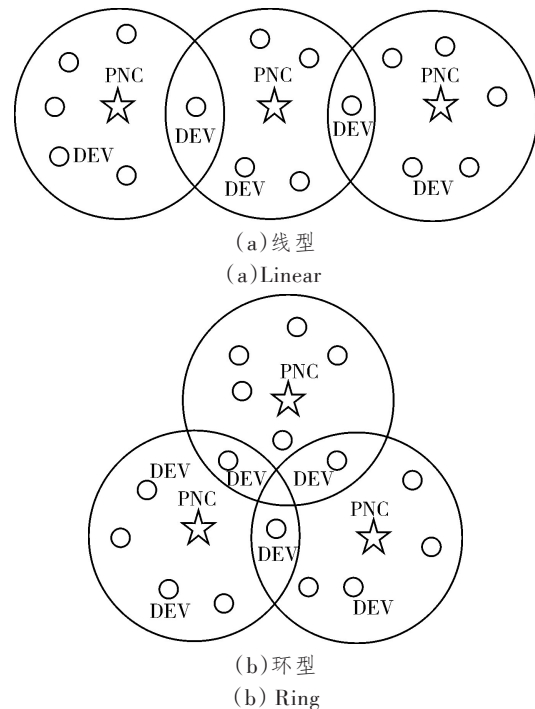


图 1 多 PAN 太赫兹网络模型

Figure 1 Multi-PAN terahertz network model

协调超帧结构如图 2 所示,每个超帧分为信标帧队列时段(Beacon Alignment Period, BAP)、CAP 和信道时间分配时段(Channel Time Allocation Period, CTAP)。CTAP 又分为常规信道时间分配时段(Normal Channel Time Allocation Period, N-CTAP)和公共信道时间分配时段(Public Channel Time Allocation Period, P-CTAP)。

← BAP →	← CAP →	← N-CTAP →	← P-CTAP →
BP ₁	CAP	CTA ... CTA	P-CTAP ₁
BP ₂	CAP	CTA ... CTA	P-CTAP ₂
BP ₃	CAP	CTA ... CTA	P-CTAP ₃

注:BP₁~BP₃为 BAP 的子时段。

图 2 协调超帧结构

Figure 2 Coordinated superframe structure

多个太赫兹 WPAN 相互接触后开始超帧协调工作,超帧协调工作开始前各 PAN 各自独立并均采用普通超帧结构,该结构如图 3 所示,多 PAN 协调后改为使用协调超帧结构。与普通超帧结构不同,BAP 分为多个 Beacon 时段,PNC 在其对应的时段广播 Beacon 帧,该帧中主要包括自身 WPAN 内所有节点的基本信息和时隙分配信息。在 CAP 中,DEV 向 PNC 节点通过时隙申请帧和入网申请帧,来完成时隙申请操作和节点入网流程。协调超帧结构将 CTAP 划分为 N-CTAP 和 P-CTAP,并分别用于同一 WPAN 内节点之间以及不同 WPAN 中涉及网桥节点的跨 PAN 数据传输过程。

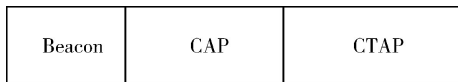


图 3 普通超帧结构

Figure 3 Common superframe structure

2 问题描述

经过对现有协议的分析发现,目前的分布式多 PAN 太赫兹 WPAN MAC 协议存在以下问题:

①在当前协调超帧结构中,网桥节点必须在收到跨 PAN 数据的下一超帧进行时隙申请,并在时隙申请的下一超帧 CTAP 才能进行数据转发,因此导致数据传输时接入时延较高的问题;

②现有解决方案将同一 PAN 内的所有边缘节点设置为一种类型,按照收发节点类型来分配时隙资源,并未考虑不同部分的时隙申请需求与时隙资源不匹配导致的时隙资源浪费问题;

③现有机制中状态变化节点在时无隙需求时不能向 PNC 汇报,若此时存在节点向其发送数据,由于 PNC 缺少最新的节点状态信息则会导致 PNC 向 DEV 分配不可靠的干扰时隙。

3 MAC 协议优化

为解决上述问题,本文提出了 LLHR-MAC 协议,协议包含了跨 PAN 低时延的新协调超帧结构、多 PAN 边缘节点的时隙分配优化机制以及基于 BAP 的节点状态信息补充报告机制。

3.1 跨 PAN 低时延的新协调超帧结构

本文提出了一种跨 PAN 低时延的新协调超帧结构,新的协调超帧结构在包含原有时段的基础上对顺序进行调整,调整过后的时段顺序为 BAP、P-CTAP、CAP 和 N-CTAP。在原协调超帧结构框架下,由于 P-CTAP 靠后导致网桥节点只能在接收

到跨 PAN 数据的下一超帧进行时隙申请。协调超帧结构调整后,网桥节点收到跨 PAN 数据帧后在当前超帧即可进行时隙申请。

基于新协调超帧结构进行数据传输的主要步骤如下:

①多个太赫兹 PAN 相互接触,通过网桥节点开始超帧协调工作。

②重叠区域内的网桥节点将侦听到的 Beacon 帧信息通过心跳消息向高级 PNC 节点发送。

③高级 PNC 节点收到 Beacon 帧信息后使用新超帧协调结构并设置各时段起止时间等信息,再通过网桥节点转发给其他 WPAN 内的 PNC 节点进行超帧同步。

④采用新协调超帧结构后,DEV 在 P-CTAP 进行跨 PAN 数据传输;CAP 中的网桥节点收到跨 PAN 数据后立即进行转发数据的时隙申请工作;最后进入 N-CTAP 进行正常的 PAN 内节点间数据传输。

3.2 边缘节点时隙分配优化机制

边缘节点时隙分配优化机制包括了动态时隙分配机制和节点状态类型汇报优化机制。新机制将节点分为普通节点和多种不同的边缘节点类型。以图 4 为例,线型和双 PAN 的网络模型也仍然适用,设 3 个 WPAN 中的节点分别为 A、B 和 C, A_N 为 WPAN-A 中的普通节点, A_{EB} 和 A_{EC} 分别为靠近 WPAN-B 和 WPAN-C 的边缘节点,其他网络内的节点同理。

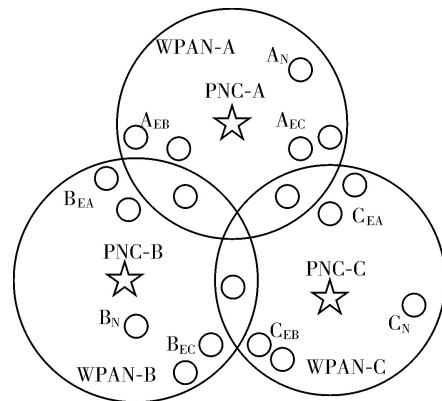


图 4 多 PAN 太赫兹边缘节点无线网络模型

Figure 4 Multi-PAN terahertz edge node wireless network model

3.2.1 动态时隙分配机制

由于普通节点间数据传输对其他 WPAN 不造成干扰,因此针对现有时隙分配机制存在部分节点业务需求不足从而导致时隙资源浪费的问题,动态

时隙分配机制提出将该类传输单独由 PNC 动态分配至剩余时隙数最多的分类中,同时为填补原有分类中该传输类型的空缺,该机制将边缘节点根据造成干扰对象的不同进行再分类并重新定义普通节点间数据传输类型外的分类规则,以图 4 为例,表 1 所示为数据传输分类规则。

表 1 数据传输分类规则

Table 1 Classification rules for data transmission

类别	数据传输分类		
I 类	$A_{EB} \rightarrow A_{EC}$	$B_{EA} \rightarrow B_{EC}$	$C_N \rightarrow C_{EB}$
	$A_{EB} \rightarrow A_N$	$B_{EA} \rightarrow B_N$	$C_N \rightarrow C_{EA}$
II 类	$A_{EC} \rightarrow A_{EB}$	$B_{EC} \rightarrow B_{EA}$	$C_{EB} \rightarrow C_N$
	$A_{EC} \rightarrow A_N$	$B_{EC} \rightarrow B_N$	$C_{EA} \rightarrow C_N$
III 类	$A_N \rightarrow A_{EB}$	$B_N \rightarrow B_{EC}$	$C_{EA} \rightarrow C_{EB}$
IV 类	$A_N \rightarrow A_{EC}$	$B_N \rightarrow B_{EA}$	$C_{EB} \rightarrow C_{EA}$
V 类	$A_{EB} \rightarrow A_{EC}$	$B_{EC} \rightarrow B_{EC}$	$C_{EA} \rightarrow C_{EA}$
VI 类	$A_{EC} \rightarrow A_{EC}$	$B_{EA} \rightarrow B_{EA}$	$C_{EB} \rightarrow C_{EB}$

不同 PAN 内的 PNC 将 N-CTAP 的时隙资源按照上述分类进行划分并为自身 WPAN 内节点间的数据传输申请分配对应时隙,但收到普通节点间数据传输的时隙申请时,PNC 需要先对自身各部分剩余时隙量进行对比,再将其分配至自身剩余量最多的分类中。该机制主要步骤如下:

①未入网以及未判断自身类型的节点采用节点状态类型汇报优化机制来判断自身节点状态并在向 PNC 节点申请时隙资源时进行汇报。

②PNC 若判断时隙申请帧为不同 WPAN 节点间的数据传输申请时隙,则转步骤④;若判断时隙申请帧为网内节点间的数据传输申请时隙,则根据时隙申请帧中的收发节点类型通过数据传输分类判断其对应分配的时隙,转步骤③。

③PNC 按照步骤②中所判断的对应时隙进行分配,若剩余时隙不足,则将所剩时隙全部分配给该申请,申请中不足的部分在下一超帧优先进行分配。若 PNC 判断收发节点均为普通节点,则检查自身所有分类部分的时隙资源剩余量,然后将普通节点间数据传输分配至其剩余量最多的部分。

④PNC 通过时隙申请帧为 PAN 间数据传输申请分配对应的时隙资源。本机制结束。

3.2.2 节点状态类型汇报优化机制

在 3 个及更多 WPAN 中存在多种边缘节点类型的情况,现有机制需要 DEV 提供其侦听对象的更多信息才能完成节点类型判断和时隙分配工作,因此本机制提出 DEV 需持续记录所侦听到的网络

标识符(Piconet Identifier, PNID),并不再通过时隙申请帧直接进行节点状态的汇报,改为通过在该帧的保留位中记录 PNID 号,再由 PNC 接收,对节点类型判断。

在节点类型汇报优化机制中,节点在 CAP 通过时隙申请帧中的保留位字段向 PNC 汇报自身所侦听到的所有 PNID 号,其中保留位首位字段为记录的不同 PNID 号的个数,余位填充不同的 PNID 号,PNC 节点先通过保留位字段的首位判断普通节点和边缘节点类型,若首位为 1,则判断该节点为普通节点;若首位>1,则判断该节点为边缘节点,再通过剩余保留位不同的 PNID 号将边缘节点进行分类。其具体操作如下:

①节点入网前先侦听信道。若没有侦听到 Beacon 帧,则自身成为 PNC 并广播 Beacon 帧。若侦听到 Beacon 帧,取出其内的 PNID,若只有一种 PNID,则转步骤②;若接收到两种不同的 PNID 信息,则转步骤③。

②节点收到 Beacon 帧后在 CAP 进行时隙申请等工作。进入 N-CTAP 后再次侦听信道并记录侦听到的数据帧中的 PNID 号,转步骤④。

③节点在 CAP 开启超帧协调工作,分别向相邻 WPAN 的 PNC 发送心跳消息,PNC 收到后根据其内的协调消息将自身的普通超帧结构调整为协调超帧结构,协调过程结束后 PNC 节点记录该节点为网桥节点,转步骤④。

④在后续超帧的 CAP 时段中,有时隙申请需求的节点将自身记录的一种或多种 PNID 号填入时隙申请帧中的保留位字段,该字段的首位填入不同的 PNID 号数量,剩余位中填入相同或不同的 PNID 号,转步骤⑤。

⑤PNC 收到时隙申请帧后,通过比较保留位中的 PNID 号的数量与数值,将节点分为网内的普通节点和不同类型的边缘节点。

3.3 节点状态汇报补充机制

针对在现有协调超帧中空闲 BAP 资源的浪费问题,节点状态汇报补充机制提出,将 BAP 内空闲资源用于汇报节点状态的变化信息。

该机制定义了一种新的节点状态信息帧,在一个超帧时长内,规定若 DEV 节点状态发生变化,则需要在自身对应信标时段的下一个小 Beacon 时段向 PNC 节点汇报 Beacon 自身状态信息,对应最后一个信标时段的 DEV 需在首个 Beacon 时段发送节点状态信息帧,PNC 节点收到后更新网内节点状

态,所有节点均采用载波侦听多点接入/碰撞避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance,CSMA/CA)方式向 PNC 发送该帧。

节点状态信息帧的帧结构中只包含 MAC 头部与帧检验序列(Frame Check Sequence,FCS)尾部,Frame Control 字段中的 Frame type 属性值设置为“010”来向 PNC 节点表明该帧为节点状态信息帧,本机个域网标识符(My Piconet Identifier,MPNID)为自身所在 PAN 的 PNID 号,外部个域网标识符(External Piconet Identifier,EPNID)为侦听到的其他 WPAN 的 PNID 号,SrcID 和 DestID 分别表示发送节点和目的节点的标识符(Identifier,ID)。其 MAC 帧头部如图 5 所示。

字节:1	1	2	2	2
SrcID	DestID	MPNID	EPNID	Frame Control
MAC header				

图 5 MAC 帧头部

Figure 5 The MAC frame header

节点状态汇报补充机制的主要步骤如下:

①节点入网前需先侦听信道并记录侦听到的不同的 Beacon 帧数量和不同 PNID 号。

②节点根据帧中包含的各时段信息在 CAP 向 PNC 发送入网申请帧,并将自身侦听到的 PNID 号填入其中,PNC 收到后判断其是否为网桥节点并记录其节点状态。

③节点入网后,有数据传输需求的节点在 CAP 内进行时隙申请,随后通过节点状态类型汇报机制判断节点状态。

④若节点状态发生变化或侦听到的 PNID 号在数量与数值上与上次不同,则在下一超帧对应时段内向 PNC 发送节点状态信息帧,PNC 接收到该帧后更新对应节点状态信息。

4 仿真分析

本文使用 OPNET 14.5 仿真工具对 LLHR-MAC、IEEE 802.15.3 以及文献[6]提出的高效快速融合太赫兹 MAC 协议(Efficient and Fast Convergence of Terahertz MAC Protocols,EFC-MAC)和文献[8]提出的低干扰多 PAN 太赫兹 WPAN MAC 协议(Low Interference Multi-PAN MAC Protocol for Terahertz WPAN,LI-PAN)进行了仿真验证。仿真模拟参数如表 2 所示。

表 2 主要仿真参数

Table 2 Main simulation parameters

仿真参数	数值
仿真场景大小	50 m×50 m
仿真运行时间/s	30
节点数量/个	8,13,18,23,28
PNC 数量/个	3
数据包产生间隔/s	0.000 5
数据包大小/bytes	11 500
数据传输速率/Gbit/s	15
超帧长度/s	0.028
发射功率/W	10

4.1 数据帧传输成功率

数据帧传输成功率如图 6 所示。由图可见,随着节点数目的增多,传输成功率不断下降。而 LLHR-MAC 协议的传输成功率始终高于其他对比 MAC 协议,原因在于:该协议采用节点时隙分配优化机制,利用 N-CTAP 内的空闲时隙资源以及分配低干扰时隙,以提高数据帧传输成功率;采用节点状态汇报补充机制降低了节点状态变化信息未能及时传达对成功率造成的影响,提高了数据帧传输的成功率和可靠性。

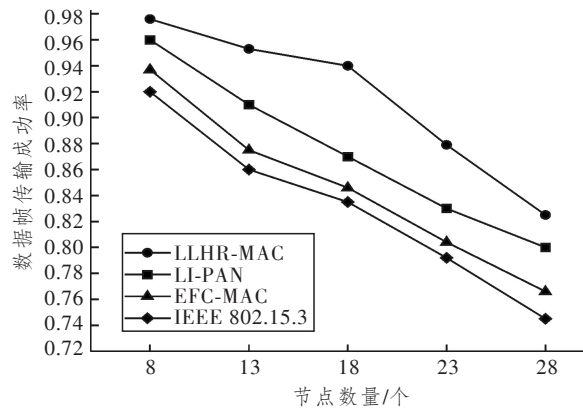


图 6 数据帧传输成功率

Figure 6 Data frame transmission success rate

4.2 数据帧平均接入时延

数据帧平均接入时延如图 7 所示。由图可见,随着节点数量的增加,数据平均接入时延上升,而 LLHR-MAC 协议的数据平均接入时延均低于其他两种 MAC 协议,原因在于:采用跨 PAN 低时延的协调超帧结构能使跨 PAN 数据帧更快速地到达目标节点;节点时隙分配优化机制降低了节点间数据传输受到的干扰影响,进一步降低了时延;采用节点状态汇报补充机制降低了 PNC 由于错误的节点状态信息而分配干扰时隙的影响。

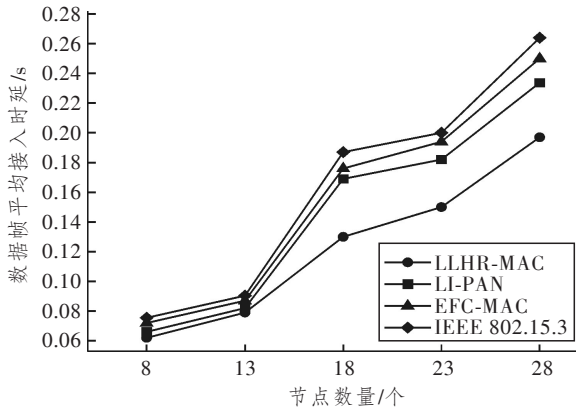


图7 数据帧平均接入时延

Figure 7 Average access delay of data frames

4.3 MAC层吞吐量

MAC层吞吐量如图8所示。由图可见,随着节点数量的增多,整体网络的MAC层吞吐量也逐渐上升,节点数量达到一定阈值后,MAC层吞吐量增长速度开始放缓。LLHR-MAC协议的MAC层吞吐量高于其他对比协议,原因在于:采用新协调超帧结构能使跨PAN数据包在网桥节点处更快地转发到目的节点,相同时间内转发的跨PAN数据包更多,提高了MAC层的吞吐量;节点时隙分配优化机制利用空闲的时隙资源进行数据传输,提高了MAC层的吞吐量。

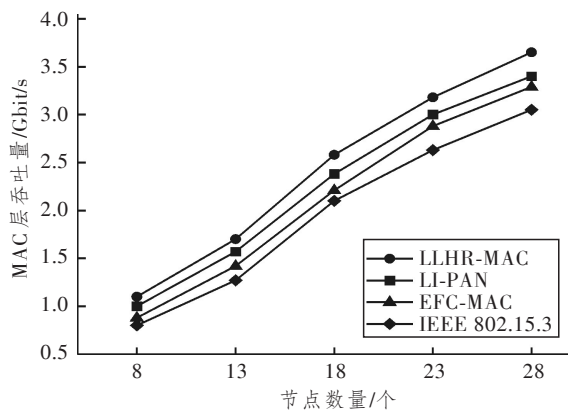


图8 MAC层吞吐量

Figure 8 MAC layer throughput

4.4 时隙利用率

时隙利用率如图9所示。由图可见,随着网络中节点数量的增多,整个网络时隙利用率逐渐上升,当节点数量达到一定阈值后,时隙利用率将趋于稳定。LLHR-MAC协议的时隙利用率高于其他对比协议,原因在于:采用边缘节点时隙分配优化机制能够利用由于部分节点业务量申请不足导致的空闲时隙资源;节点状态汇报补充机制能将节点状态变化信息及时传递给PNC,提高了PNC分配时隙的成

功率和时隙利用率。

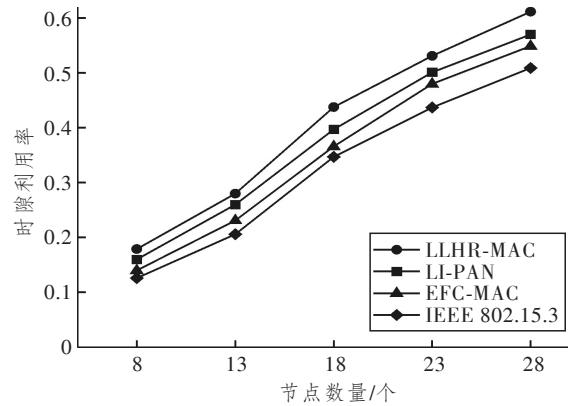


图9 时隙利用率

Figure 9 Time slot utilization

5 结束语

本文针对目前协议中存在的协调超帧结构中的不足、多PAN太赫兹网络边缘节点的时隙资源浪费和节点状态信息汇报不及时的问题,提出了LLHR-MAC协议,包括提出改进的协调超帧结构、边缘节点时隙分配优化机制和节点状态汇报补充机制。仿真结果表明,该协议提高了数据帧的传输成功率、降低了数据传输的平均接入时延并提高了MAC层吞吐量和时隙利用率。

参考文献:

- [1] 杨世超,陶建胜,王岩松. 对太赫兹频谱监测和管理的初步探讨[J]. 中国无线电, 2020(7): 30-33.
Yang S C, Tao J S, Wang Y S. Terahertz Spectrum Monitoring and Management[J]. China Radio, 2020(7): 30-33.
- [2] 王磊,周海东,吴佳琪,等. 一种快速传输的太赫兹无线个域网MAC协议[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 648-652.
Wang L, Zhou H D, Wu J Q, et al. A Fast Transport MAC Protocol for THz Wireless Personal Area Network [J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(6): 648-652.
- [3] Bhattacharjee A, Bhattacharjee R, Bose S K. A Dynamic Approach for Channel Time Allocation in IEEE 802.15.3 based Parent - Child Piconet Model [C]// TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. Penang, Malaysia: IEEE, 2017: 8227977.
- [4] 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.
- [5] 刘洋, 任智, 古金东, 等. 高效低时延分级多PAN太赫兹无线网络MAC层优化协议[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(8): 1966–1971.
- Liu Y, Ren Z, Gu J D, et al. Efficient and Low Latency MAC Layer Optimization Protocols for Hierarchical Multi-PAN Terahertz Wireless Networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(8): 1966–1971.
- [6] 古金东, 任智, 陈春宇, 等. 高效快速融合的双LAN太赫兹无线局域网MAC协议[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(10): 3114–3119.
- Gu J D, Ren Z, Chen C Y, et al. Efficient and Fast Convergence of Dual-LAN Terahertz Wireless LAN MAC Protocol[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(10): 3114–3119.
- [7] Sindian S, Khalil A, Samhat A E, et al. Resource Allocation in High Data Rate Mesh WPAN: a Survey Paper[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 74(2): 909–932.
- [8] 任智, 苏新, 郭黎, 等. 低干扰多PAN太赫兹无线个域网MAC协议[J]. 光通信研究, 2021(4): 66–71.
- Ren Z, Su X, Guo L, et al. Low Interference Multi-PAN MAC Protocol for Terahertz Wireless PAN[J]. Study on Optical Communications, 2021(4): 66–71.
- [9] 任智, 康健, 徐兆坤, 等. 太赫兹无线个域网高时隙利用率跨PAN数据传输协议[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(8): 2513–2516.
- Ren Z, Kang J, Xu Z K, et al. High Time Slot Utilization Cross PAN Data Transmission Protocol for Terahertz Wireless Personal Area Network[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(8): 2513–2516.
- [10] 李宁, 霍兵, 宋瑞良, 等. 多PAN太赫兹无线个域网边缘节点信息高效报告方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1709–1716.
- Li N, Huo B, Song R L, et al. Efficient Reporting Approach of Edge Nodes' Information in Multi-PAN Terahertz Wireless Personal Area Network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(5): 1709–1716.