

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.211228002

引用格式:姚玉坤,周杨,周霜霜,等.太赫兹网络中基于优先级调度的低开销双信道 MAC 协议[J].电讯技术,2023,63(6):849-854.  
[YAO Y K,ZHOU Y,ZHOU S S,et al. A low overhead dual-channel MAC protocol based on priority scheduling in terahertz networks[J].  
Telecommunication Engineering,2023,63(6):849-854.]

# 太赫兹网络中基于优先级调度的低开销双信道 MAC 协议\*

姚玉坤,周 杨,周霜霜,任丽丹,张本俊

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

**摘要:**针对现有太赫兹通信网络双信道 MAC 协议存在控制开销冗余和在竞争信道时缺少优先级调度策略等问题,提出了一种太赫兹网络中基于优先级调度的低开销双信道 MAC 协议(Low Overhead Dual-channel MAC Protocol Based on Priority Scheduling, LO-PSMAC),包含通信距离预判、优先级调度策略的 CSMA/CA 和精简 THz 频段 MAC 帧三种机制,可有效提升信道利用率和整体网络吞吐量,同时减小控制开销和降低数据平均时延。仿真结果表明,所提协议与现有太赫兹双信道 MAC 协议相比,MAC 层吞吐量和信道利用率分别提升了 7.14% 和 14.75%,数据平均时延降低了 14.21%。

**关键词:**太赫兹通信网;双信道 MAC 协议;优先级调度

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN928 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2023)06-0849-06

## A Low Overhead Dual-channel MAC Protocol Based on Priority Scheduling in Terahertz Networks

YAO Yukun,ZHOU Yang,ZHOU Shuangshuang,REN Lidan,ZHANG Benjun

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

**Abstract:**For the problems of control cost redundancy and lack of priority scheduling strategy in competing channels in existing dual-channel MAC protocols in terahertz communication networks,a Low Overhead Dual-channel MAC Protocol Based on Priority Scheduling in Terahertz Networks (LO-PSMAC) is proposed. LO-PSMAC includes three mechanisms: communication distance prediction, CSMA/CA of priority scheduling policy,and THIN THz band MAC frame. The three mechanisms can effectively improve channel utilization and overall network throughput,and reduce the control cost and average delay. Simulation results show that compared with those of the existing MAC protocols,the MAC layer throughput and channel utilization of the proposed protocol are improved by 7.14% and 14.75%,respectively,and the average data delay is reduced by 14.21%,which demonstrates the effectiveness of the proposed protocol.

**Key words:**terahertz communication network;dual-channel MAC protocol;priority scheduling

\* 收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-02-11  
基金项目:国家自然科学基金面上项目(61971080)  
通信作者:周杨

# 0 引言

随着现代通信技术的不断发展,人们对于传输速率的要求也越来越高,但现有的通信网络往往限制在较低的频段,严重影响数据传输速率,而利用高频段的太赫兹信道可有效提升传输速率。太赫兹<sup>[1-4]</sup>(0.1~10 THz)频段提供从几十 GHz 到几 THz 的大带宽,可以满足未来十年中 100 Gb/s 甚至 1 Tb/s 数据速率的增长需求。虽然太赫兹频段具有如此大的传输速率,但其特殊的物理特性容易造成较大的路径损耗,进而影响其通信距离。因此,如何有效地增加太赫兹网络的通信距离成为当前亟待解决的一大难题。

随着对太赫兹通信技术研究的不断深化,人们考虑到利用定向传输的方法来改善太赫兹路径损耗问题。目前,研究人员设计出了利用介质访问控制(Media Access Control, MAC)协议<sup>[5-9]</sup>来实现数据通信。太赫兹双信道 MAC 协议在 WiFi 信道全向发送控制帧进行 THz 信道的预约,在 THz 信道定向进行数据帧的传输。其中, Yao 等人<sup>[10]</sup>提出了一种辅助波束对准的太赫兹双信道 MAC 协议(Assisted Beamforming MAC Protocol for Terahertz Communication Networks, TAB-MAC),可成功在 WiFi 信道上进行波束对准,并在太赫兹信道上进行数据传输。Zhang 等人<sup>[11]</sup>在上述研究的基础上提出了一种分布式太赫兹网络的双无线电辅助协议(Dual-Radio-Assisted MAC Protocols for Distributed Terahertz Networks, DRA-MAC),相较于现有的 TAB-MAC 协议,减少了帧交互过程,并在控制帧中省略了节点的位置信息,各个节点采用 AOA/AOD (Angle of Arrival/Angle of Departure) 技术来定位其他节点,以此来进行太赫兹定向波束对准,但仍然存在控制开销冗余和在竞争信道时缺少优先级调度策略等问题。

针对以上问题,本文提出了一种太赫兹网络中基于优先级调度的低开双信道 MAC 协议(Low Overhead Dual-channel MAC Protocol Based on Priority Scheduling, LO-PSMAC),并通过仿真验证了协议的有效性。

## 1 网络模型和问题描述

### 1.1 网络模型

DRA-MAC 协议控制信令采用 2.4/5 GHz 全向无线电,数据传输采用太赫兹波束形成。初始链路

建立采用请求-发送(RTS-GHz)/测试-传输(TTT-THz)握手方式。在每个节点构建网络表,记录面向接收机的网络分配向量(Network Allocation Vector, RNAV)值、数据的偏离角(AOD)和 RTS-GHz 的到达角(AOA)。

图 1 中每个节点配备有 2.4 GHz WiFi 全向天线和 THz 定向天线。该网络为分布式网络,无中心节点,场景中任意两个节点间可直接进行通信。由于场景中的节点不配备有 GPS 定位模块,因此 DRA-MAC 协议中各个节点采用 AOA/AOD 技术来定位其他节点,以此来进行太赫兹定向波束对准。

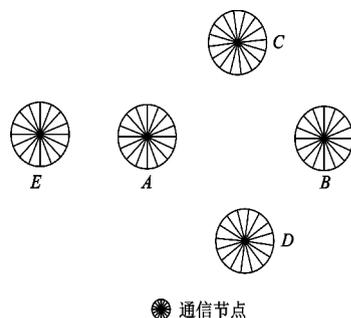
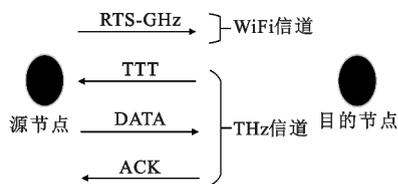
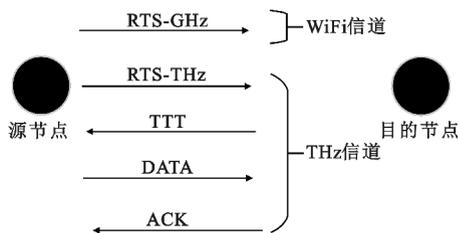


图 1 DRA-MAC 协议网络模型图

针对不同情况, DRA-MAC 协议包含两种帧交互流程:第一种帧交互流程如图 2(a)所示,其源节点未存有目的节点方位信息;第二种帧交互流程如图 2(b)所示,其源节点存有目的节点方位信息。



(a) 源节点未存有目的节点方位信息时的帧交互流程



(b) 源节点存有目的节点方位信息时的帧交互流程

图 2 DRA-MAC 协议帧交互过程

DRA-MAC 协议的具体思想是:有数据传输请求的源节点通过调用存储器,即网络表中的 AOD 存储器,是否已经在它自己和目的节点之间被记录。一方面,如果 AOD 存储器已经存在,源节点可以采

用优势 AOD 直接发送定向 RTS-THz,而不是在 2.4/5 GHz 信道广播 RTS。此外,RTS-GHz 是同时广播的,通知所有其他节点正在进行的传输。其中,RTS-GHz 广播帧的持续时间信息与 RTS-THz 相同。该操作有助于提高链路关联阶段的效率。另一方面,如果没有记录主路径,源节点采用 RTS-GHz 作为控制信号,等待带有角度信息的 TTT 响应。目的节点接收到 RTS-GHz 后,分析并记录全向 RTS 的 AOA 信息,然后以 TTT 回应。通过接收 TTT,源节点记录相应的 AOD 并进行数据传输。

## 1.2 问题描述

通过对 DRA-MAC 协议的深入研究,发现以下问题:

问题 1:在 DRA-MAC 协议中,在 WiFi 频段进行 THz 信道的预约,THz 信道进行数据传输,但由于 WiFi 频段的通信距离要远远大于 THz 频段的通信距离,因此可能会导致节点能够正常的进行太赫兹信道的预约,但是却无法进行数据传输。

问题 2:在实际通信中,有些含有重要信息的高优先级数据帧需要尽快传输,但现有的太赫兹双信道 MAC 协议中,网络场景中的节点都是采用 CSMA/CA 协议来竞争信道,CSMA/CA 协议并不支持任何优先级机制的情况,因此需要设定一种机制,使得需要传输高优先级数据帧的节点有更大的概率能够竞争到信道。

问题 3:现有 MAC 协议中,MAC 帧中的 Duration 字段主要在预约信道的时候使用的,而现有的太赫兹双信道 MAC 协议中,节点在 WiFi 信道进行全向发送控制帧来预约信道,因此在 THz 信道进行定向传输的 MAC 帧可省略该字段。

## 2 LO-PSMAC 协议

针对以上问题存在的缺点和不足,本文提出了 LO-PSMAC 协议:针对问题 1,提出了“通信距离预判”机制,目的节点判断源节点发送功率不足够与它进行通信时,发送拒绝传输帧取消此次数据帧传输;针对问题 2,提出了“优先级调度策略的 CSMA/CA”机制,将 MAC 帧分为高优先级和低优先级两种帧类型格式,源节点根据将要发送的帧的类型设置不同的退避参数和退避时间,以提高将发送高优先级帧的源节点竞争信道的成功率;针对问题 3,提出了“精简 THz 频段 MAC 帧”机制,将在 THz 信道上进行定向传输的 MAC 帧中 2 b 的 Duration 字段

删除。

### 2.1 通信距离预判机制

#### 2.1.1 通信距离预判机制思路

目的节点在 WiFi 信道接收到 RTS 帧时,根据 WiFi 信道接收到 RTS 帧时的接收功率计算出源节点与目的节点的距离。计算公式如式(1)所示:

$$d = d_0 10^{\frac{P_0(d_0) - P_r(d) + X_\sigma}{10\eta}} \quad (1)$$

式中: $P_0(d_0)$ 表示在距离信号发射端  $d_0$  处的接收强度; $\eta$ 表示路径损耗参数; $X_\sigma$ 是服从正态分布的随机变量,用来反映信号的发射现象对接收到的信号强度造成的影响。

再根据此距离计算出目的节点在太赫兹收音机上接收 MAC 帧时的接收功率,计算公式如式(2)所示:

$$P_{r-THz} = \frac{G_t G_r c^2 e^{-k_{abs}d} P_{t-THz}}{16\pi^2 f^2 d^2} \quad (2)$$

式中: $G_t$ 和  $G_r$ 分别为发送天线增益和接收天线增益; $c$ 为真空中的光速大小; $k_{abs}$ 为介质的分子吸收系数。

若目的节点计算出的接收功率大于接收阈值(只有接收功率大于该阈值时,目的节点才能正确的接收数据),则按原协议操作,否则发送拒绝传输帧(Reject Transmission Frame, RTF)取消此次发送。接收功率阈值计算公式如式(3)所示:

$$P_{t-v} = P_{noise} SNR_{min} \quad (3)$$

式中: $P_{noise}$ 为噪声功率; $SNR_{min}$ 为节点能够正确接收信号的最小信噪比。

噪声功率  $P_{noise}$  计算公式如式(4)所示:

$$P_{noise} = \int_B N(f, d) df = k_B \int_B T_{noise}(f, d) df \quad (4)$$

式中: $B$ 为所选频带的带宽; $N$ 为噪声功率谱密度; $f$ 为传输频率; $k_B$ 为玻尔兹曼常数; $T_{noise}$ 为等效噪声温度。

拒绝传输帧格式如图 3 所示。

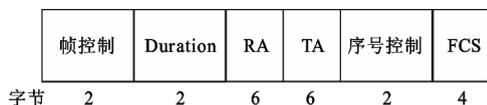


图 3 RTF 帧格式

#### 2.1.2 通信距离预判机制操作步骤

**Step 1** 有数据传输请求的源节点在 WiFi 信道上向目的节点全向发送 RTS 帧,转 Step 2。

**Step 2** 目的节点接收到 RTS 帧后通过公式

(1) 计算出源节点与目的节点的距离,再通过公式  
(2) 计算出太赫兹收音机上接收到源节点发送的数据帧时的接收功率的大小。若该接收功率大于接收功率阈值(接收功率阈值通过公式(3)计算),转步 Step 3,否则转 Step 4。

**Step 3** 按原协议进行操作。

**Step 4** 发送 RTF 至源节点取消此次发送。

## 2.2 优先级调度策略的 CSMA/CA 机制

### 2.2.1 优先级调度策略的 CSMA/CA 机制思路

在 DRA-MAC 协议中将 MAC 帧分为高优先级和低优先级两种帧类型格式(以帧控制字段中 b11 位来区分帧的类型,若 b11 位为 1 则为高优先级包,若 b11 位为 0 则为低优先级包),源节点根据将要发送的帧的类型设置不同的退避参数 CW(竞争窗口长度,表示允许发送前要求信道连续空闲的次数)和退避时间,以提高将发送高优先级帧的源节点竞争信道的成功率。帧控制字段结构示意图如图 4 所示,其中,Protocol version 字段为协议版本号,Frame type 为帧类型,SEC 为是否启用密钥保护帧体,ACK policy 为确认过程的类型,Retry 为是否为重传帧,More data 为是否使用信道中剩余的时间,Reserved 为保留位。

bitsb15-b11	b10	b9	b8-b7	b6	b8-b3	b2-b0
Reserved	More data	Retry	ACK policy	SEC	Frame type	Protocol version

图 4 帧控制字段结构示意图

### 2.2.2 优先级调度策略的 CSMA/CA 机制操作步骤

**Step 1** 首先设置发送高优先级帧的源节点的 CW=1,低优先级帧的源节点的 CW=2,转 Step 2。

**Step 2** 源节点在  $[0, 2^{N_b} - 1]$  ( $N_b$  为退避次数) 范围内产生一个随机数的退避时隙  $N_1$ 。若源节点发送低优先级帧,则退避时间设置为  $N_1 \times \tau$  ( $\tau$  为一个时隙的时间长度);否则,退避时间设置为  $\alpha \times N_1 \times \tau$  ( $\alpha$  为退避系数,  $\alpha \in (0, 1)$ ),转 Step 3。

**Step 3** 若信道为空闲时,打开计时器,否则将退避计时器挂起。若退避计数器减为 0 时,转 Step 4,否则转 Step 3。

**Step 4** 执行 CCA 检查信道状态,若 CCA 侦听信道为忙,转 Step 2,否则转 Step 5。

**Step 5** 将 CW 值减 1,若 CW=0 时,转 Step 6,否则转 Step 4。

**Step 6** 源节点发送 RTS 帧。

## 2.3 精简 THz 频段 MAC 帧机制

将在 THz 信道上进行定向传输的 MAC 帧中 2 B 的 Duartion 字段删除,进而减少控制开销。改进后的 MAC 帧格式如图 5 所示,RA 字段为接收节点 MAC 地址,TA 字段为发送节点 MAC 地址,序号控制字段的作用是使得接收方能够正确判断是否为重传帧。

帧控制	RA	TA	序号控制	帧主体	FCS
字节 2	6	6	2	0~2304	4

图 5 改进 MAC 帧格式

## 2.4 PS-LOMAC 协议操作流程

### 2.4.1 WiFi 信道

**Step 1** 有数据传输请求的源节点采用“优先级调度策略的 CSMA/CA”机制去竞争信道,竞争信道成功的源节点全向发送 RTS 帧,转 Step 2。

**Step 2** 目的节点接收到 RTS 帧后采用“通信距离预判”机制判断源节点功率是否足够与目的节点在 THz 信道上进行定向通信,若不足够转 Step 3,否则转 Step 4。

**Step 3** 目的节点发送 RTF 帧至源节点,至此通信结束。

**Step 4** 目的节点切换到 THz 信道。

### 2.4.2 THz 信道

**Step 1** 目的节点采用“精简 THz 频段 MAC 帧”机制并向源节点在 THz 信道定向发送 TTT 帧,转 Step 2。

**Step 2** 源节点采用“精简 THz 频段 MAC 帧”机制并向目的节点在 THz 信道定向发送 DATA 帧,目的节点接收完数据帧后回复源节点 ACK 帧,至此通信结束。

## 3 仿真实验验证

本文使用 Microsoft Visual Studio 2010 开发环境软件、OPNET14.5 仿真软件和当前流行的 C/C++ 编程语言进行实验,在相同的网络场景下比较了 LO-PSMAC 和 DRA-MAC 协议的性能。

### 3.1 仿真参数设置

主要仿真参数如表 1 所示,其中,随机种子表示产生随机数的种子值,反应随机数的状态;切换时延表示从 WiFi 信道切换到 THz 信道使用的时间;退避系数为本文所提出的概念,详细意义见 2.2 节,取值

为 0.5,是最优性能的取值。

表 1 主要仿真参数

参数	默认值
仿真场景/m	10×10
节点个数	4, 8, 12, 16, 20, 24
切换时延/ns	10
节点最大传输功率/mw	100
WiFi 载波频率/GHz	2.4
WiFi 传输速率/(Mb/s)	100
THz 载波频率/THz	0.5
THz 传输速率/(Gb/s)	10
仿真时间/s	60
随机种子	64, 128, 256, 512, 1 024
退避系数 $\alpha$	0.5

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 MAC 层吞吐量

MAC 层吞吐量的仿真结果如图 6 所示,由图可知,当节点数量逐渐增大时,MAC 层吞吐量不断地增加,主要因为在整个网络中将会有更多的节点参与通信,最后,由于每种协议的业务量达到上限,MAC 层吞吐量会趋于平稳。从图中可以看出,LO-PSMAC 协议 MAC 层吞吐量始终高于 DRA-MAC 协议,主要原因在于,“通信距离预判机制”“优先级调度策略的 CSMA/CA 机制”和“精简 THz 频段 MAC 帧”这三个机制都在不同程度上减少了控制开销和测试时延,从而在相同的信道时间内可以发送更多的数据。最终,以上三种机制都在不同程度上提高了网络吞吐量。

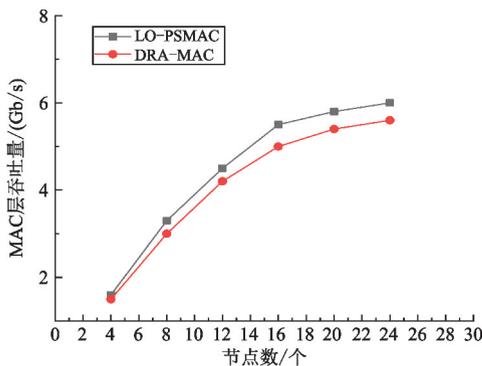


图 6 MAC 层吞吐量

#### 3.2.2 数据平均时延

数据平均时延的仿真结果如图 7 所示,由图可知,数据平均时延随节点数的增加而增加,原因在于随着节点数的增加,使数据碰撞加剧。另外,图中显示 LO-PSMAC 协议的数据平均时延始终小于 DRA-

MAC 协议,主要原因在于,“通信距离预判机制”有效避免由于源节点功率不足以与目的节点进行通信时所引起的不必要的 RTS 帧的重传,“优先级调度策略的 CSMA/CA”机制对于高优先级的包能够更快地竞争信道,通过这两个机制减少了测试时延,而“精简 THz 频段 MAC 帧”机制减少了 2 b 的 Duration 字段,加快了数据传输。因此通过以上三种机制降低了数据传输时延。

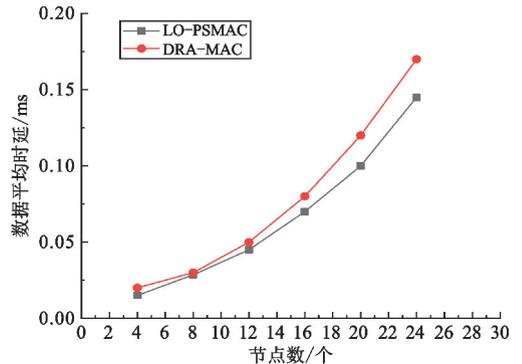


图 7 数据平均时延

#### 3.2.3 信道利用率

THz 频段信道利用率的仿真结果如图 8 所示,由图可知,当节点数越多时,将会有更多的节点参与通信,因此信道利用也会逐渐增大,但 LO-PSMAC 协议的信道利用率始终高于 DRA-MAC 协议,主要原因在于,在网络运行总时间相同的情况下,LO-PSMAC 协议执行了“通信距离预判机制”,若源节点通信距离不足够时,至少可以省略 3 次或 3 次以上的 RTS 帧重传过程,从而减小了控制帧交互的时间,而“优先级调度策略的 CSMA/CA 机制”对于高优先级的包能够更快地竞争信道,使得在 WiFi 频段占用的时间更少,这两个机制都在不同程度上减少了在 WiFi 频段上占用的时间,使得更多的网络运行时间在 THz 信道上用于数据传输,从而提高了信道利用率。

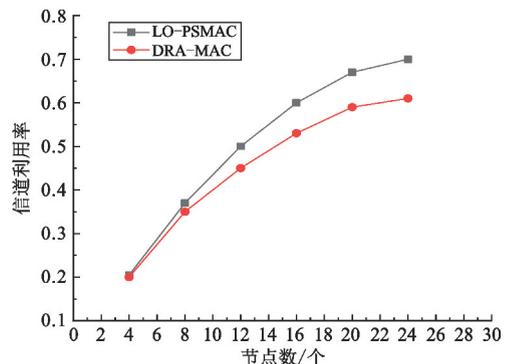


图 8 信道利用率

## 4 结束语

本文主要针对 DRA-MAC 协议中存在控制开销冗余和在竞争信道时缺少优先级调度策略等问题进行改进,提出了一种 LO-PSMAC 协议,包括“通信距离预判”“优先级调度策略的 CSMA/CA”和“精简 THz 频段 MAC 帧”机制这三种机制。通过通信距离预判机制,可有效避免由于源节点功率不足以与目的节点进行通信时所引起的不必要的 RTS 帧的重传。通过优先级调度策略的 CSMA/CA 机制,提升了高优先级帧的发送概率。通过精简 THz 频段 MAC 帧机制,将在 THz 信道上进行定向传输的 MAC 帧中 2 b 的 Duration 字段删除,有效减少了控制开销。仿真验证了 LO-PSMAC 协议的有效性。

由于现有的太赫兹双信道 MAC 协议针对于移动性的场景研究较少,因此后续将对太赫兹网络中移动性节点方面的 MAC 协议进行研究。

### 参考文献:

- [ 1 ] CACCIAPUOTI A S, SANKHE K, CALEFFI M, et al. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6) :110-115.
- [ 2 ] WU P, WEI Z, XUAN Y, et al. A novel high-gain directional lens antenna for terahertz band[J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2016, 68(1) :107-117.
- [ 3 ] ZANELLA F, FILGUEIRAS H R D, VALERIO G, et al. Nano-antenna modelling based on plasmonic charge distribution for THz-based 6G applications [ C ]// Proceedings of 2020 2nd 6G Wireless Summit. Levi: IEEE, 2020:1-4.
- [ 4 ] BARROS M T, MULLINS R, BALASUBRAMANIAM S, et al. Integrated terahertz communication with reflectors for 5G small cell networks [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7) :5617-5657.
- [ 5 ] OKWORI M, BEHFARNIA M, ESLAMI A. Towards microscale NFC-enabled IoT sensors: physical and MAC layer design analysis [ J ]. IEEE Access, 2020, 8:

88076-88084.

- [ 6 ] TIWARI K K, LAURENSEN D, GRASS E, et al. MAC layer beamforming: rate loss due to beam cusping [ C ]// Proceedings of 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference. Norman: IEEE, 2021:1-7.
- [ 7 ] BURATTI C, MESINI L, VERDONE R. Comparing MAC protocols for industrial IoT using terahertz communications [ C ]// Proceedings of 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal. London: IEEE, 2020:1-7.
- [ 8 ] YAO X W, NI F, WANG C C. Multi-beam on-demand power allocation MAC protocol for MIMO terahertz communication networks [ C ]// Proceedings of 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops. Changchun: IEEE, 2019:158-163.
- [ 9 ] XIA Q, HOSSAIN Z, MEDLEY M, et al. A link-layer synchronization and medium access control protocol for terahertz-band communication networks [ J ]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 55(5) :2-18.
- [ 10 ] YAO X W, JORNETJ M. TAB-MAC: assisted beamforming MAC protocol for terahertz communication networks [ J ]. Nano Communication Networks, 2016, 9(3) :36-42.
- [ 11 ] ZHANG X, HAN C, WANG X. Dual-radio-assisted (DRA) MAC protocols for distributed terahertz networks [ J ]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2021, 15(2) :111-124.

### 作者简介:

姚玉坤 女, 1964 年生于重庆, 1990 年获硕士学位, 现为教授, 主要研究方向为网络管理与应用、网络编码。

周 杨 男, 1997 年生于重庆, 2019 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹双信道 MAC 协议。

周霜霜 女, 1997 年生于重庆, 2019 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为无线定位、目标跟踪。

任丽丹 女, 1996 年生于山西吕梁, 2019 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为软件定义网络、网络编码。

张本俊 男, 1997 年生于安徽六安, 2019 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为无人机自组网络路由协议。