

## 新的太赫兹超高速无线网络媒体访问控制协议

周 逊<sup>1</sup>, 曹亚楠<sup>2\*</sup>, 张庆伟<sup>1</sup>, 任 智<sup>2</sup>, 漆自名<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

(\* 通信作者电子邮箱 caoyan88@163.com)

**摘 要:**针对现有无线网络媒体访问控制(MAC)协议难以在太赫兹(THz)载频条件下实现 10 Gbps 级别超高速无线接入的问题,提出一种新的太赫兹超高速无线网络 MAC 协议——MAC-T。MAC-T 设计了新的时分多路访问(TDMA)+载波侦听多路访问(CSMA)自适应混合 MAC 接入机制和一种新的超帧结构,并定义了对应于太赫兹通信的关键参数,从而使最大数据传输速率达到 10 Gbps 以上。理论分析和仿真结果表明:MAC-T 协议能够在太赫兹无线网络中正常运行,数据传输速率达到了 18.3 Gbps,是 IEEE 802.15.3c 标准定义的最大速率 5.78 Gbps 的 2.16 倍,数据帧的平均接入时延约为 0.0044 s,性能相对于 IEEE 802.15.3c 标准提高了 42.1%,从而在 MAC 协议方面为太赫兹超高速无线网络的研究和应用提供了有力支撑。

**关键词:**太赫兹;无线网络;媒体访问控制协议;超高速;超帧

**中图分类号:** TP393.04 **文献标志码:** A

## New medium access control protocol of terahertz ultra-high data-rate wireless network

ZHOU Xun<sup>1</sup>, CAO Yanan<sup>2\*</sup>, ZHANG Qingwei<sup>1</sup>, REN Zhi<sup>2</sup>, QI Ziming<sup>1</sup>

(1. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To realize 10 Gbps level wireless access under the condition of terahertz (THz) carrier frequency, a new Medium Access Control (MAC) protocol for THz ultra-high data-rate wireless networks, MAC-T (Medium Access Control for THz) was proposed in this paper. In MAC-T, a new TDMA (Time Division Multiple Access) + CSMA (Carrier Sense Multiple Access) adaptive hybrid MAC access control mechanism and a new superframe structure were designed. Moreover, some key parameters corresponding to terahertz communications were defined. Therefore, MAC-T could make the maximum data transmission rate reach up to 10 Gbps or higher. The theoretical analysis and simulation results show that MAC-T can operate normally in terahertz networks and the data rate can reach up to 18.3 Gbps which is 2.16 times 5.78 Gbps that IEEE 802.15.3c can achieve. Meanwhile, the average access delay of MAC-T is 0.0044 s which improves about 42.1% compared with that of IEEE 802.15.3 which is 0.0076 s. Thus, MAC-T can provide significant support in the research and application of terahertz ultra-high data-rate wireless networks.

**Key words:** terahertz (THz); wireless network; Medium Access Control (MAC) protocol; ultra-high data-rate; superframe

## 0 引言

当前无线通信和计算机网络技术迅速发展,无线网络逐渐扩展到人们工作和生活当中。随着无线网络应用的逐步深入和规模的日益扩大,人们对网络高数据传输速率的需求变得越来越显著。目前,多媒体视频文件下载、海量数据传输对数据传输速率有着很高的要求,而在研究和已投入应用的无线网络,如无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)和无线城域网(Wireless Metropolitan Area Network WMAN)等,均难以支持 Gbps 以上的数据传输速率;因此,人们正在付出更多努力研发相应的网络技术以满足这些需要。在此背景下,太赫兹(terahertz, THz)超高速无线网络<sup>[1]</sup>逐渐引起人们的关注。太赫兹超高速无线网络是一种不同于传统无线网络的

新型无线网络,它工作在太赫兹频段而且可支持 10 Gbps 以上的数据传输速率。

太赫兹超高速无线网络的正常运行离不开媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)协议的支持,而目前关于太赫兹超高速无线网络 MAC 协议方面的研究尚不多见,这对太赫兹超高速无线网络的研究和应用带来了不利影响。由于 IEEE 802.15.3c 标准<sup>[2-3]</sup>定义的高速无线通信技术在载波频率(60 GHz)和数据传输速率(5.78 Gbps)方面已经接近太赫兹超高速无线网络,因此本文以它为借鉴,通过设计新的接入控制机制、定义新的超帧(superframe)结构和关键参数,提出了一种适用于太赫兹超高速无线网络的新 MAC 协议——MAC-T(Medium Access Control for THz),使最大数据传输速率达到了 10 Gbps 以上。

**收稿日期:** 2013-05-22; **修回日期:** 2013-07-17。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972068); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40051); 中国工程物理研究院激光聚变研究中心—重庆邮电大学科研合作项目(201201)。

**作者简介:** 周逊(1968-),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向:太赫兹通信; 曹亚楠(1987-),女,河南鹤壁人,硕士研究生,主要研究方向:太赫兹超高速无线网络 MAC 接入协议; 张庆伟(1978-),男,河北定州人,高级工程师,主要研究方向:太赫兹通信; 任智(1971-),男,四川内江人,教授,博士,主要研究方向:宽带无线移动通信网络; 漆自名(1987-),男,四川大英人,高级工程师,主要研究方向:太赫兹通信。

# 1 太赫兹超高速无线网络

## 1.1 太赫兹波

太赫兹波<sup>[4-5]</sup>是一种位于毫米波和红外光波之间的电磁波,波长在 0.03 mm ~ 3 mm,频率范围为 0.14 THz ~ 10 THz,如图 1 所示。太赫兹波处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,是最后一个人类尚未完全认知和利用的频段。虽然太赫兹波在空气中传播时会有一定衰减<sup>[6]</sup>,但它能够提供较大的带宽和较高的传输容量,因此在短距离超高速无线通信方面有巨大的应用潜力,尤其在室内短距无线通信方面较有前途。目前,世界上已有包括我国在内的多个国家在研究太赫兹通信技术,我国的太赫兹通信实验系统已经实现 10 Gbps 以上的数据传输速率。

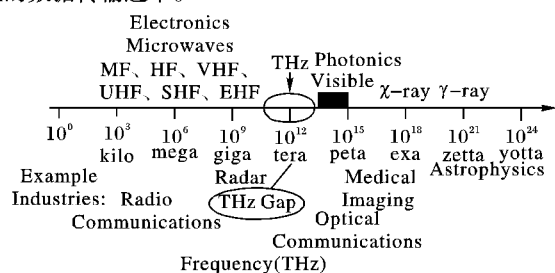


图1 太赫兹波在电磁波谱中的位置

## 1.2 太赫兹超高速无线网络

太赫兹超高速无线网络是使用太赫兹频段无线载波进行通信、数据传输速率可达 Gbps 级别的网络。目前受人们关注的太赫兹超高速无线网络主要以包含多个节点(称为 Device, DEV)的个域网(Personal Area Network, PAN)的形式出现,网络节点可为静态或动态,通信范围通常约为 10 m;网络含有一个中心控制节点——微微网协调器(Piconet Coordinator, PNC)<sup>[7]</sup>,由一个 DEV 充当,通过广播信标帧(beacon)提供基本的定时机制和信道接入控制信息;网络中任意两个节点可以直接通信,最大数据(data)传输速率可达 10 Gbps 以上;网络组成如图 2 所示。

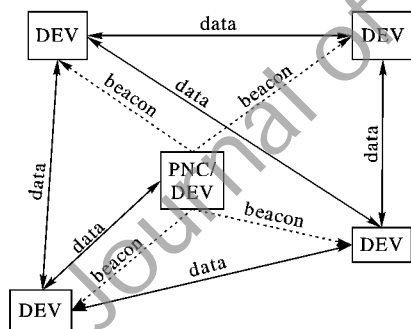


图2 太赫兹超高速无线网络组成

## 1.3 太赫兹超高速无线网络对 MAC 协议的要求

为使太赫兹超高速无线网络正常运行且在 MAC 层的最大数据传输速率达到 Gbps 级别,其 MAC 协议应满足以下要求:

- 1) 适合太赫兹超高速无线网络架构。太赫兹超高速无线网络是有中心控制节点的网络,所以其 MAC 协议应适用于这种集中控制的网络架构。
- 2) 支持 10 Gbps 以上的最大数据传输速率。太赫兹超高速无线网络的最大数据传输速率在 10 Gbps 以上,MAC 协议必须支持该级别的通信。
- 3) 保障信道资源分配的公平性。各个节点成功接入网络的概率应相等。

4) 应有较高的接入概率。接入概率反映了网络对于试图接入信道的业务流的接纳能力。为了实现 Gbps 级别的通信,MAC 协议应有较强的业务流接纳能力。

5) 稳定。当网络的业务负载在短时间内超出其最大传输能力或无线信道在短时间内出现深衰落时,MAC 协议仍然能够正常运行,且能够维持较高的吞吐量。

## 2 新的太赫兹超高速无线网络 MAC 协议

基于上文所述的 5 方面要求,本文设计了一种新的适用于太赫兹超高速无线网络的 MAC 协议——MAC-T。MAC-T 采用“TDMA(Time Division Multiple Access) + CSMA(Carrier Sense Multiple Access)<sup>[8-9]</sup>”的混合接入方式,以 TDMA 为基础,按需结合 CSMA/CA。MAC-T 设计了新的超帧和 MAC 接入机制,并在关键参数的设置上考虑了太赫兹超高速通信的特点。

### 2.1 新超帧设计

#### 2.1.1 新超帧结构

太赫兹超高速无线网络信道时间由一系列超帧<sup>[10-11]</sup>组成。在 MAC-T 中,本文提出一种新的超帧结构,包括两个信标时段(Beacon)、竞争接入时段(Contention Access Period, CAP)<sup>[12]</sup>和信道时间分配时段(Channel Time Allocation Period, CTAP)<sup>[13]</sup>三部分,如图 3 所示。

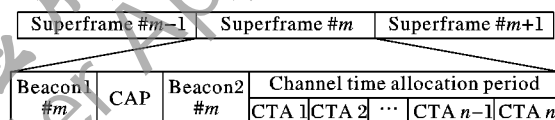


图3 太赫兹超高速无线网络新 MAC 协议超帧结构

在 MAC-T 的超帧结构中,Beacon1 时段用于 PNC 广播超帧持续时间、CAP 的起止时间等;CAP 主要用于交换网络中的命令帧、DEV 向 PNC 申请时隙等;Beacon2 时段用于 PNC 广播时隙分配情况;CTAP 可由多个 CTA(Channel Time Allocation)时隙构成,主要用于交换网络中的同步/异步数据流,由于 CTAP 主要用于数据传输;因此它在超帧中所占比例越大,网络吞吐量也就越大。

#### 2.1.2 新超帧的不同之处

相对于图 4 所示 IEEE 802.15.3c 标准定义的超帧,MAC-T 的超帧有以下不同之处:

- 1) 增加了 Beacon 2 信标帧。

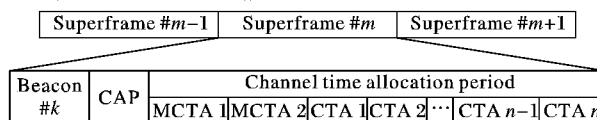


图4 IEEE 802.15.3c 标准定义的超帧结构

由于 IEEE 802.15.3c 标准定义的超帧在 CAP 后缺少信标帧,PNC 根据收到的时隙请求确定时隙分配方案后,难以找到时间将该方案广播给申请时隙的节点,会影响后续的数据传输;而 MAC-T 的新超帧用 Beacon2 时段解决了这个问题。

- 2) 不包含 MCTA 时隙。

在 IEEE 802.15.3c 标准定义的超帧中,MCTA(Management Channel Time Allocation)时隙可作为一般的 CTA 使用,也可代替 CAP 进行命令帧的传输,由此可见它的功能可用 CTA 和 CAP 来实现。因此,MAC-T 的超帧删除了 MCTA 时隙,腾出了更多的时隙资源用于数据传输且接入性能未受影响,有利于提高吞吐量。

#### 2.1.3 自适应的简化设计

当网络中只有一个 PNC 和一个 DEV 时,DEV 发送时隙

申请时无需竞争信道,因此,MAC-T 将原来的 CAP 换成了时长很小、使用 TDMA 方式的 SAP(Slot Application Period),SAP 时段仅供 DEV 发送 1 bit 的时隙申请信息;这样既不会影响接入效果,又能减少控制时隙,使更多的时隙资源投入 CTAP 用于数据传输,有利于提高吞吐量。简化的 MAC-T 超帧如图 5 所示。

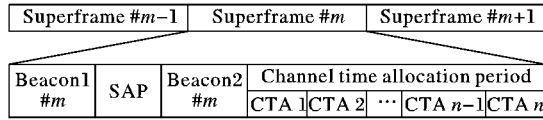


图 5 简化的 MAC-T 超帧

## 2.2 MAC 接入机制设计

MAC-T 协议使用“TDMA + CSMA”的混合接入机制,将网络运行时间分为多个超帧,每个超帧内包含 Beacon、CTAP 等不同的时段。根据应用场景的不同,MAC-T 协议设计了两种原理相同但操作有所区别的 MAC 接入机制。

1) 网络含有多个 DEV。

多 DEV 时 MAC 接入机制的操作定义如下:

①在 Beacon1 时段,PNC 向所有 DEV 广播一个包含定时、超帧时长、CAP 及 Beacon2 时长等基本信息的信标帧。

②在 CAP 时段,有数据传输需求的 DEV 用 CSMA 方式向 PNC 发送时隙请求消息。

③在 Beacon2 时段,PNC 根据收到的时隙请求进行 CTA 时隙分配并将 CTA 时隙分配结果用信标帧广播给所有 DEV。

④在 CTAP 时段,获得 CTA 时隙的 DEV 在各自的时隙内发送数据。

2) 网络含有 1 个 DEV。

单 DEV 时 MAC 接入机制的操作定义如下:

①在 Beacon1 时段,PNC 向 DEV 广播一个包含定时、超帧时长、SAP 及 Beacon2 时长等基本信息的信标帧。

②在 SAP 时段,如果 DEV 有数据传输需求,则向 PNC 发送长度仅为 1 bit 的时隙请求消息。

③在 Beacon2 时段,PNC 根据收到的时隙请求进行 CTA 时隙分配并将 CTA 时隙分配结果用信标帧广播给 DEV。分配规则为:

a) 若 DEV、PNC 都有数据要发送,则各分配一半的 CTA 时隙,间插安排;

b) 若只有一方有数据要发送,则 CTA 时隙全部分配给它;

c) 若双方均无数据要发送,则无 CTAP 时段,在 Beacon2 时段后,直接进入下一超帧。

④在 CTAP 时段,需发送数据的节点在各自的时隙内发送数据。

## 2.3 PNC 的产生

PNC 由 DEV 充当,通过以下机制产生:

1) DEV 扫描信道。

2) DEV 如果没有监听到任何信息,则将自己的角色定为 PNC,开始广播信标帧。

3) DEV 如果收到其他节点广播的信标帧,则发送入网申请消息;如果被拒绝入网,则申请成为现有网络的子网的 PNC;如果仍被拒绝,则将自己的角色定为 PNC,开始广播信标帧。

## 2.4 关键参数设计

帧间间隔、数据字段长度等关键参数对太赫兹超高速网络 MAC 协议的传输性能有重要影响。为了达到 10 Gbps 以上的最大数据传输速率,新 MAC 协议关键参数的设置如表 1

所示。

表 1 新 MAC 协议关键参数设置

参数	值
mMaxSuperframeDuration	65 535 $\mu$ s
mMinSuperframeDuration	1 000 $\mu$ s
mMaxLostBeacons	4.0
sifs_time	0.5 $\mu$ s
pCCADetectTime	4 $\mu$ s
Clock accuracy	$\pm 25$ ppm
pBackoffSlot	4.2 $\mu$ s
pMaxFrameBodySize	8 388 608 $\times$ 8.0 b
pMaxTransferUnitSize	8 388 576 $\times$ 8.0 b
bifs_time	4.5 $\mu$ s

与 IEEE802.15.3c 标准定义的参数相比,上述关键参数中的帧间间隔 sifs\_time 从原来的 2.5  $\mu$ s 减小到 0.5  $\mu$ s,CAP 时段的回退时间 bifs\_time 从原来的 6.5  $\mu$ s 减小到 4.5  $\mu$ s,其原因是 MAC-T 协议需要支持 10 Gbps 以上的最大数据传输速率,高于 IEEE802.15.3c 定义的 5.78 Gbps。

## 2.5 吞吐量分析

与图 3 的超帧结构对应,文献[14]提出的吞吐量  $Th$  计算公式为:

$$Th = \frac{\sum_{i=0}^{M/2} (CTA_i \cdot k \cdot B)}{M/2 \cdot L_f} \quad (1)$$

其中: $M$  为网络中节点总数; $CTA_i$  为 CTA 数量; $k$  为 CTA 传输帧的数量; $B$  为帧的大小,单位为 Byte; $L_f$  为超帧时长。由于 MAC-T 减小了 sifs\_time 和 bifs\_time,删除了 MCTA 时隙且自适应地压缩了 CAP 时段,因此能够使 CTA 的数量  $CTA_i$  上升,数据传输时间所占比重增加,则由式(1)可知,网络吞吐量增加。

## 3 仿真实验

本文将 MAC-T 协议与 IEEE802.15.3c 定义的 MAC 协议通过仿真进行性能比较,考察的性能参数为 MAC 层平均数据传输速率、MAC 接入成功率以及平均接入时延、载波频率等。

### 3.1 仿真统计量

1) MAC 层平均数据传输速率。

MAC 层平均数据传输速率是指单位时间内 1 个节点的 MAC 层成功接收的平均比特数,计算公式为:

$$V_{mac} = B/T \quad (2)$$

其中: $V_{mac}$  表示 MAC 层平均数据传输速率, $B$  为 1 个节点的 MAC 层成功接收的总比特数, $T$  为数据传输所用时间。

2) 数据帧平均接入时延。

数据帧平均接入时延表示一个数据帧从送达 MAC 层到被发送到信道上所经历的平均时间,可用式(3)计算:

$$D_a = \frac{\sum (T_s - T_a)}{N_f} \quad (3)$$

其中: $D_a$  表示数据帧平均接入时延, $T_s$  表示数据帧的发送时刻, $T_a$  表示 MAC 层从上层收到数据帧的时刻, $N_f$  表示数据帧的数量。

3) 接入成功率。

接入成功率表示节点 MAC 层成功收到的帧所占比率,反映 MAC 协议接入功能的可靠性,可用式(4)计算:

$$S = F_r/F_s \quad (4)$$

其中: $S$  表示接入成功率, $F_r$  表示 MAC 层成功接收的帧数, $F_s$

表示 MAC 层发送的帧数。

#### 4) 载波频率。

在通信过程中,把一个较低的信号频率调制到一个相对较高的频率上去,这个被低频调制的较高频率即为载波频率,简称载频。

### 3.2 仿真参数设置

使用仿真软件平台是 OPNET 14.5,设置节点的业务模型及相关仿真参数如表 2 所示。3 个同质静态节点随机均匀分布,数据分组的到达服从泊松分布。

表 2 仿真参数设置

参数	值
仿真场景	50 m × 50 m
节点个数	3
节点距离	≤ 10 m
节点通信半径	10 m
THz 数据分组产生平均间隔	0.000 001 s
802.15.3c 数据分组产生平均间隔	0.000 004 s
数据分组大小	2 500 B
仿真时间	30 s
数据发送起始时间	0.2 s

### 3.3 仿真结果及分析

#### 1) MAC 层平均数据传输速率。

图 6 显示 MAC-T 协议的 MAC 层平均数据传输速率约为 18.3 Gbps,且曲线较为平稳,说明 MAC-T 协议通过设计新的超帧、删除 MCTA 时隙和在满足条件时用 SAP 时段代替 CAP 时段,以及将 sifs\_time 和 bifs\_time 分别减小到 0.5 μs 和 4.5 μs,有效增加了数据传输时间所占比重,从而显著提升了 MAC 层平均数据传输速率,比 IEEE802.15.3c 达到的 4.6 Gbps 高出了 2.97 倍,而且性能较为稳定。

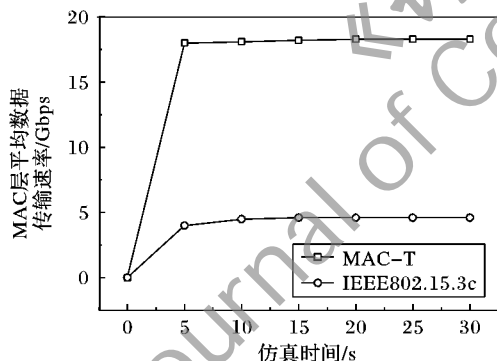


图6 MAC层平均数据传输速率比较

#### 2) 数据帧平均接入时延。

从图 7 可看出:与 MAC-T 协议和 IEEE 802.15.3c 的 MAC 协议的数据帧平均接入时延分别约为 0.0044 s 和 0.0076 s,在该性能上 MAC-T 提高了约 42.1% ( $(0.0076 - 0.0044)/0.0076 \approx 42.1\%$ )。这说明了 MAC-T 在接入机制、超帧方面的新设计和关键参数的新设置在太赫兹通信的有利条件下能够加快帧的发送,使数据帧在 MAC 层的等待时间明显缩短,从而有益于吞吐量的提高和信道带宽的充分利用。

#### 3) 接入成功率。

图 8 显示:MAC-T 协议和 IEEE802.15.3c 的 MAC 协议在 MAC 层的接入成功率都达到了 1,即发送节点发出的所有数据帧都被接收节点成功接收。这说明 MAC-T 协议能够保障数据帧的成功收发,与 IEEE802.15.3c 的 MAC 协议一样具有很高的可靠性。

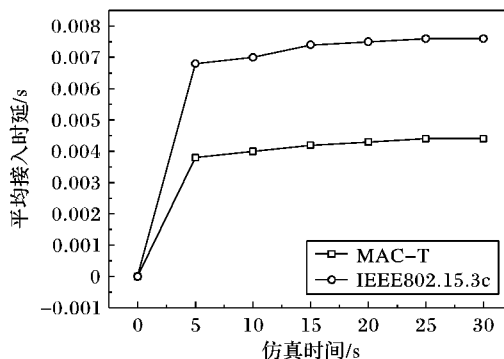


图7 数据帧平均接入时延比较

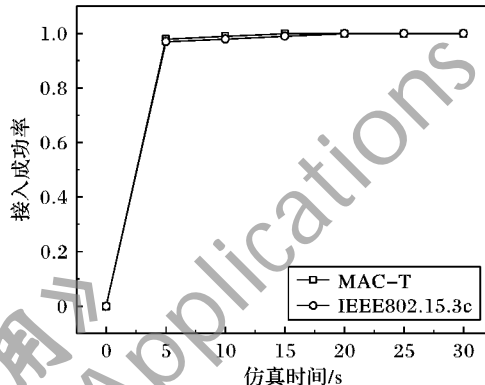


图8 接入成功率比较

#### 4) 载波频率。

载波频率反映了 MAC 协议工作的物理频段。从图 9 可以看出:IEEE802.15.3c 的 MAC 协议工作在 60 GHz 频段,而 MAC-T 协议的工作频率是 340 GHz,表明它工作在 0.14 THz ~ 10 THz 的太赫兹频段,从而表明 MAC-T 与现有的 MAC 协议不同,它是一种适用于太赫兹通信的 MAC 协议。

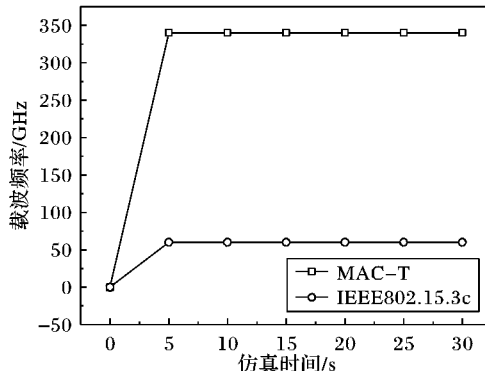


图9 载波频率比较

## 4 结语

为了对太赫兹无线网络中 10 Gbps 级别的超高速通信提供支持,本文提出一种新的太赫兹超高速无线网络 MAC 协议——MAC-T,通过设计新的接入机制、超帧结构和设置对应于太赫兹通信的关键参数值,MAC-T 在 340 GHz 的载频下达到了 18.3 Gbps 的平均数据传输速率,显示了它是一个适用于太赫兹超高速无线网络的 MAC 协议。而现有的 IEEE 802.15.3c 及其相关改进算法大都是采用与物理层的波束赋形技术相结合的方式提高网络吞吐量或提出最佳的 CAP 时间长度,使得网络吞吐量最大;但网络数据传输速率均未达到 10 Gbps 的级别。MAC-T 可使得网络在 340 GHz 的载频下达到 18.3 Gbps,因此 MAC-T 的提出使得太赫兹超高速无线网络 MAC 协议的研究和应用有了力支撑。在未来的工作中,本

文拟通过优化时隙分配等环节进一步提高 MAC-T 的接入性能。

#### 参考文献:

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(6): 703 – 707.
- [2] 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) amendment 2: millimeter-wave-based alternative physical layer extension [S]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 3 – 57.
- [3] IEEE. 802.15.3-2003—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) [S]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 8 – 182.
- [4] THOMAS K O, NAGATSUMA T. A review on terahertz communications research [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(2): 143 – 171.
- [5] YANG Y, MANDEHGAAR M, GRISCHKOESKY D R. Understanding THz pulse propagation in the atmosphere [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(4): 406 – 415.
- [6] JACOB M, PRIEBE S, KVRNER T, *et al.* An overview of ongoing activities in the field of channel model, spectrum allocation and standardization for mm-wave and THz indoor communications [C]// Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1 – 6.
- [7] BAYKAS T, SUM C S, ZHOU L, *et al.* IEEE 802.15.3c: the first IEEE standard for data rates over 1Gb/s [J]. IEEE Communication Magazine, 2011, 49(7): 114 – 121.
- [8] KWON J H, KIM E J, KANG C H. CAD-MAC: coverage adaptive directional medium access for mmWave wireless personal area networks [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2012: 751 – 754.
- [9] 郭宇航. 基于 UWB 技术的高速无线个域网 MAC 协议研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [10] ALI K A, H MOUFTAH T. Wireless personal area networks architecture and protocols for multimedia applications [J]. Multimedia Ad Hoc and Sensor Networks, 2011, 9(4): 675 – 686.
- [11] SINGH H, YONG S K, OH J, *et al.* Principles of IEEE 802.15.3c: multi-Gigabit millimeter-wave wireless PAN [C]// Proceedings of the 18th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1 – 6.
- [12] GONG M X, STACEY R, AKHMETOV D. A directional CSMA/CA protocol for mmWave wireless PANs [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1 – 6.
- [13] CHAO H L, HSU M P. CTAP-minimized scheduling algorithm for millimeter-wave-based wireless personal area networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 3840 – 3852.
- [14] PYO C W, HARADA H. Throughput analysis and improvement of hybrid multiple access in IEEE 802.15.3c mm-wave WPAN [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(8): 1414 – 1424.

(上接第 3018 页)

## 4 结语

在对 DV-Hop 算法的定位原理进行研究, 分析其存在的不足的基础上, 通过引入新的邻居节点估计方法和未知节点估计位置校准步骤, 提出了 CDV-Hop 算法。通过理论分析和仿真结果可以看出, 与 DV-Hop 算法及文献[5]中的 IDV-Hop 算法相比, CDV-Hop 算法受节点随机分布影响较小, 定位精度有了明显提高。并且较 DV-Hop 算法, 没有额外的通信开销, 继承了其低成本和低功耗的优势, 是无线传感器网络定位的一种可选方案。

#### 参考文献:

- [1] HE T, HUANG C, BLUM B M, *et al.* Range-free localization schemes for large scale sensor networks [C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2003: 81 – 95.
- [2] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857 – 868.
- [3] LI J, ZHANG J M. A weighted DV-Hop localization scheme for wireless sensor networks [C]// Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Embedded Computing and IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 269 – 272.
- [4] YU W Q, LI H. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2012: 199 – 202.
- [5] BAO X R, BAO F P, ZHANG S, *et al.* An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 469 – 471.
- [6] PANUAR A, KUMAR S A. Localization schemes in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the Second International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 443 – 449.
- [7] 胡峰松, 孟湘琴. 多维平均跳距值的 DV-Hop 定位算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(28): 42 – 44.
- [8] WU G, WANG S, WANG B, *et al.* A novel range-free localization based on regulated neighborhood distance for wireless Ad Hoc and sensor networks [J]. Computer Networks, 2012, 56(7): 3581 – 3593.
- [9] MA D, ER M J, WANG B. Analysis of hop-count-based source-to-destination distance estimation in wireless sensor networks with applications in localization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2998 – 3011.
- [10] GUI L Q, VAL T, WEI A. Improving localization accuracy using selective 3-anchor DV-Hop algorithm [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Vehicular Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1 – 5.
- [11] 郑吉平, 张永平, 赵国安, 等. 基于节点间连通性差异 DV-Hop 定位算法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(6): 45 – 49.
- [12] 冯江, 朱强, 吴春春. 改进的 DV-Hop 定位算法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(19): 74 – 77.