

一种自适应的太赫兹无线个域网高效定向MAC协议

任 智^① 吕昱辉^{*①} 徐兆坤^① 邹明芮^② 田洁丽^①

^① (重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

^② (中国工程物理研究院激光聚变研究中心 成都 610000)

摘 要: 针对现有太赫兹无线个域网定向MAC协议存在的波束训练开销和入网时延偏大以及Beacon, S-CAP时段时隙利用不足问题, 该文提出一种自适应的定向MAC协议——AD-MAC, 自适应地在静态场景下采用全网协同波束训练, 在动态场景下节点基于历史信息快速回复波束训练帧, 同时使用反向监听策略减小同扇区节点的帧碰撞概率, 并且通过时隙复用在Beacon和S-CAP时段并行发送控制帧和数据帧。理论分析表明了AD-MAC协议的有效性, 仿真结果显示: 相较于ENLBT-MAC等典型协议, AD-MAC在静态场景下的波束训练开销和节点平均入网时延分别降低了约21.84%和22.70%, 在动态场景下上述二指标则分别减小了约18.7%和13.07%。

关键词: 无线个域网; 太赫兹; MAC协议; 定向

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0099-08

DOI: 10.11999/JEIT180306

An Adaptive Directional MAC Protocol for Terahertz Wireless Personal Networks

REN Zhi^① LÜ Yuhui^① XU Zhaokun^① ZOU Mingrui^② TIAN Jielì^①

^① (Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology,

Chongqing University of Post & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^② (Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610000, China)

Abstract: To reduce the beamforming training cost and network delay, make the best of Beacon and S-CAP sub-period in the existing Terahertz Wireless Personal Access Network (TWPAN) directional MAC protocols, an Adaptive Directional MAC (AD-MAC) protocol for TWPAN is proposed. AD-MAC adaptively uses the entire network cooperative beam training in a static scenario, and makes network nodes quickly respond to beam training frames based on historical information in a dynamic scenario. The reverse listening strategy is used to reduce the collision probability of same sector nodes. The control frame and data frame are transmitted simultaneously in the Beacon and S-CAP slot using time-slot reuse. Theoretical analysis verifies the effectiveness of AD-MAC. Also, simulation results show that, comparing with ENLBT-MAC, AD-MAC reduces about 21.84% of beamforming training cost and 22.70% of the average network delay in static scene, and reduces about 18.7% of beamforming training cost and 13.07% of the average network delay in dynamic scene.

Key words: Wireless personal access networks; Terahertz; MAC protocols; Orientation

1 引言

近年来, 人们对通信网传输数据速率的要求在增长, 利用传统频段进行通信已经不能满足人们的

需求, 目前的趋势是向更高频段通信发展^[1]。作为一种未被完全开发利用的频段, 太赫兹频段拥有多个数百吉赫兹的可用带宽^[2], 使得大容量数据的快速传输成为可能, 因此引起了人们越来越多的关注。由于频率较高, 太赫兹频段的电磁波传播损耗较大, 在常用的功率范围内太赫兹波的全向传输范围只能达到米级^[3], 因此, 通常采用定向传输增大其通信范围^[4]。近几年, 太赫兹通信技术成为了无线通信技术的一个研究热点, 研究内容涉及太赫兹定向通信^[5]、太赫兹网络MAC协议^[6,7]、太赫兹纳

收稿日期: 2018-04-02; 改回日期: 2018-08-16; 网络出版: 2018-09-12

*通信作者: 吕昱辉 lvyuhui_cqupt@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61379159), 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0085)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61379159), The Chongqing Basic and Frontier Research Project (cstc2015jcyjBX0085)

米网通信^[8]等。

太赫兹无线个域网定向MAC协议是太赫兹定向通信的一种重要形式,目前,人们在此方面已开展了一些研究工作。Ken等人^[9]对太赫兹频段通信的场景做了介绍,指出在数据中心场景中,节点间的通信链路不仅包括直视径而且包含通过反射物的非直视径。Bile等人^[10]提出通过带外信令的方式来解决太赫兹频段波束赋形训练耗时长的的问题,由于带外信令需使用多信道通信,因此增加了系统复杂度和开销。Wang等人^[11]介绍了波束赋形训练的具体过程,波束赋形的目的是在定向传输的前提下实现收发双方波束主瓣对准对方,主要通过空间扫描的方式实现;该文假设节点接收与发送均采用同一套天线系统,节点的发送、接收方向个数相同,将波束赋形分为3个步骤:(1)一个节点在各发送方向上重复发送训练帧,每个方向发送次数等于方向数,其它节点在每个方向循环接收训练帧,发送节点在一个方向发送的时间等于接收节点循环接收一周的时间;(2)接收节点在最佳波束方向上向发送节点重复发送训练帧,发送次数等于方向数,而之前的发送节点在每个方向上循环接收训练帧;(3)发送节点在最佳波束方向上向接收节点发送确认帧。由于工作频段和数据速率相对较为接近,因此IEEE 802.15.3c(以下简称3c)标准^[12]与IEEE 802.11ad(以下简称ad)标准^[13]的定向通信机制和超帧结构可以作为太赫兹无线个域网定向通信的重要参考。在3c和ad中,若数据收发节点之前没有进行过波束赋形训练,则发送节点需向PNC申请两个CTA/SP时隙,前一个用于A和B之间的波束赋形训练(其他节点处于空闲状态),后一个用于收发节点之间的数据传输;这种波束赋形训练方式在时间和控制开销方面显得偏大。针对该问题,Akhtar等人^[14]在其提出的太赫兹定向MAC协议——ENLBT-MAC中,采用了一种“智能监听”机制:当一条链路的两个节点进行波束赋形训练时,其他节点旋转波束方向尝试接收波束训练帧,一旦收到则保存相关波束信息;若以后需要与该节点进行波束赋形训练时则可减少操作步骤。Chong等人^[15]提出一种角度复用存储辅助的太赫兹定向MAC协议,通过让节点存储波束赋形训练结果来避免重复的波束训练,这种思路对于减少波束赋形开销有积极意义,但是在节点移动的情况下需要再次进行波束赋形训练。

从上述研究现状不难看出,人们对太赫兹无线个域网定向MAC协议已经开展了研究,在波束赋形训练和定向邻居发现等方面取得一些进展。我们

通过深入研究发现,现有太赫兹无线个域网定向MAC协议在波束赋形训练开销和节点入网时延方面存在冗余,而且Beacon和Regular S-CAP时段的时隙利用不足,从而影响了波束训练开销和节点平均入网时延等性能,本文将提出一种新的太赫兹定向MAC协议(AD-MAC),对该问题加以解决。

本文后续部分安排如下:第2节给出模型并描述问题,第3节详述提出的太赫兹无线个域网高效定向MAC协议并分析协议性能,第4节进行仿真验证,第5节总结全文并给出未来工作方向。

2 模型与问题描述

2.1 网络模型

用图 $G=(V, E)$ 表示一个太赫兹无线个域网;其中节点集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $n>1$ 为网络节点数, v_n 表示网络中第 n 个节点;链路集合 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, e_m 表示网络中第 m 条链路, $1 \leq m \leq n \cdot (n-1)/2$ 。为便于研究,关于太赫兹无线个域网有如下假设:(1)网络中各节点具有相同的通信半径;(2)网络中各节点装备相同的智能天线系统,均具定向通信功能;(3)网络中任意两个节点均能直接通信。

2.2 超帧结构

对于静态节点组成网络的场景,本文将网络运行时间划分为多个首尾相连的轮,每轮的时间可根据需要设置(本文缺省设置为1 s),每轮由一个组网超帧和多个数据传输超帧组成。本文设计的组网超帧在现有相关协议的超帧结构中删除了regular S-CAP时段和regular CAP时段,并将CTAP时段全部作为波束赋形训练来使用。数据传输超帧在现有超帧结构中删除了regular CAP时段,网络中的设备可以在组网超帧或数据传输超帧入网,在数据传输超帧进行定向数据传输。对于可移动节点组成网络的场景,本文将网络运行时间划分为多个首尾相连的定向超帧,该定向超帧分为3个时段:Quasi-omni Beacon时段用于PNC发送定向信标消息, CAP时段用于未入网节点与PNC交互关联入网消息及已入网节点与PNC交互时隙请求消息,CTAP时段用于节点间的波束赋形训练和数据传输。本文在现有相关协议的定向超帧结构中删除了全向传输的regular CAP时段以避免因全向、定向通信半径的不同而出现单向链路。

2.3 问题描述

根据研究,现有太赫兹无线个域网定向MAC协议在波束赋形控制开销和入网时延方面存在以下问题:

(1) 在节点之前已做过波束赋形并且相对方向未变的情况下,收发节点仍然会扫描每个扇区,这个操作实际上是没有必要的,会带来冗余的控制开销和时间消耗。

(2) 节点间的波束赋形训练需要在每对节点之间分别单独进行,由于对之前获得的节点方向信息未加以有效利用,存在一定的冗余控制开销。

(3) 收到PNC广播的Beacon帧后,位于同一扇区的两个节点有可能在同一时段内向PNC发送关联请求消息,这会造成在PNC处发生消息碰撞,导致PNC接收失败,节点再次发送关联请求消息,引起控制开销和入网时延上升。

由于上述问题导致波束赋形控制开销和节点入网时延出现冗余影响性能,因此本文提出一种新的定向MAC协议加以解决。

3 自适应的太赫兹无线个域网高效定向MAC协议

为解决上节所述问题,本文提出了一种新的自适应高效定向MAC协议——AD-MAC(Adaptive Directional MAC),通过采用基于历史信息快速回帧、全网波束赋形训练、反向监听偏移重发、机会性复用定向Beacon子时段和S-CAP子时段5种新机制,降低波束训练开销和平均入网时延,提升MAC层吞吐量。

3.1 AD-MAC协议的新机制

AD-MAC协议采用的新机制具体如下:

(1) 基于历史信息快速回帧:“基于历史信息快速回帧”新机制的主要思路是:在动态场景下,如果需要做波束赋形的两个节点在之前做过波束赋形,则借助之前记录的波束赋形历史信息对当前的波束赋形过程进行优化,减少数据帧源、目的节点发送的波束训练帧;具体操作包括数据帧源节点从记录的对方节点所在扇区开始发送波束训练帧、数据帧目的节点从记录的对方节点所在扇区开始等待接收波束训练帧且在该扇区收到波束训练帧后立即回复一个波束训练帧等。这样就能够在不影响波束赋形效果的前提下,根据历史信息自适应地确定波束扫描起始扇区,从整体上减少波束训练帧的收发,并且缩短波束赋形过程所用时间。

在动态场景中,时间和空间不断变化,如果依照通常的惯例考虑随机性的话,一个节点出现在对方节点每个扇区的概率在统计意义上是相等的;因此,以缺省扇区与以历史记录扇区作为波束扫描起点相比,即使历史信息的可靠性发生变化,从统计结果的角度来看它们的扫描性能也是相当的。

(2) 全网波束赋形训练机制:“全网波束赋形训练机制”新机制的主要思路是:在静态场景下,节点通过得到的信息安排节点按照一定顺序(本文是按照入网顺序)扫描发送波束训练帧,网络中所有其它节点扫描接收。这样,和现有相关协议安排节点两两分别进行波束训练帧收发不同,在整个过程中每个节点只扫描发送一次,发送过程中其它节点扫描接收即可,从而使控制开销降低。

(3) 反向监听偏移重发机制:本机制是为了减小同扇区节点入网时碰撞的概率。节点在入网时首先进行反向监听,反向监听的时间自适应地由节点到PNC的距离确定,与PNC到节点的距离成反比(距离PNC越远的节点反向监听的时间越短)。若节点反向监听到其他节点向PNC发送的关联入网消息,则节点退避到下一时隙再启动发送过程。这样,处于PNC同一扇区的节点能够通过反向监听的方式错开向PNC发送关联入网请求的时机,从而有效减少碰撞,降低平均入网时延。

(4) 机会性复用定向Beacon子时段机制:现有太赫兹无线个域网定向MAC协议将超帧的Beacon时段划分为若干个子时段,在每个子时段中心节点需要向特定扇区发送定向训练帧。在不影响Beacon帧传输的前提下,新协议复用该时段进行数据帧的传输。在数据传输阶段,节点在超帧 n 的Regular S-CAP # m 子时段向PNC申请超帧 $n+1$ 的CTA时隙。当PNC在当前超帧收到的时隙请求大于一个CTAP的长度时,PNC首先根据请求消息中的源节点ID和目的节点ID确定通信的双方是否在同一扇区内。如果在同一扇区且源节点在距离PNC较近的区间、目的节点在距离PNC较远的区间,则将该链路部分安排在定向Beacon子时段内。当网络负载较大时,DEV可以在不影响Beacon帧正常接收的情况下进行数据收发。这对网络吞吐量的提升是有正面影响的。

(5) 机会性复用S-CAP子时段机制:在现有太赫兹无线个域网定向MAC协议中,Regular S-CAP时段以扇区为单位被划分为若干个子时段,在每个子时段特定扇区的节点与PNC交互时隙请求方面的信息。此时位于中心节点其他扇区的已入网节点之间不能进行数据通信。节点间的数据传输必须在CTAP时段进行。这种做法不仅降低了网络的吞吐量、而且增加了数据的等待时延。在不影响时隙请求帧交互的前提下,新协议复用该时段,同时进行数据帧的传输。当PNC在当前超帧收到的时隙请求大于一个CTAP的长度时,PNC自适应地将同扇

区链路部分安排在定向Regular S-CAP子时段内。当网络负载较大时, DEV可以在不影响时隙请求帧正常交互的情况下进行数据收发。该机制可有效提升网络吞吐量。

3.2 AD-MAC协议主要操作

节点在运行AD-MAC协议时, 首先根据节点运动状况自适应地选择运行模式, 它判断网络节点是否全部静止; 如果是, 则采用静态模式运行; 如果不是或者无法判断, 则采用动态模式运行。下面分别介绍静态模式和动态模式的操作。

3.2.1 静态模式

静态模式用“轮”来划分网络运行时间, 一轮依序包含一个组网和一个数据传输阶段; 组网阶段由N-Beacon, Association CAP和Beamforming CTAP时段组成; 数据传输阶段由D-Beacon, CAP和CTAP时段组成。

3.2.1.1 组网阶段

(1)N-Beacon时段: 该时段进行PNC到DEV的波束赋形训练。PNC按扇区序号依次在每个扇区重复发送 S 个定向训练帧(S 为扇区总数); DEV依序旋转波束方向到每个扇区以接收定向训练帧, 如果收到, 则存储接收波束的扇区号, 然后根据训练帧中包含的信息设置时间偏移 offset_1 并据其发送入网请求帧。

(2)Association CAP时段: 该时段中各DEV与PNC交互关联入网消息, 进行DEV到PNC的波束赋形训练, 具体步骤如下:

(a) PNC按扇区序号依次将波束方向对准每个扇区, 监听DEV发送的关联入网请求帧; 如果收到一个DEV发出的关联入网帧, 则为该DEV按入网顺序分配ID(即DEVID)、计算出该节点的扇区序号以及提取出帧中包含的DEV_address, 并将该信息加入待关联回复列表的尾部。各DEV在时间偏移 offset_1 到达时向PNC发送关联入网请求帧, 并等待PNC发送的关联入网回复帧; 如果收到回复帧, 则旋转波束方向以接收定向训练帧。PNC扫描监听完全部扇区后, 根据待关联回复列表中的信息向对应DEV发送关联入网回复帧。

(b) 根据“反向监听偏移重发机制”, PNC提取碰撞扇区列表中的首项并查看提取出的这一项是否为最后一项。如果否, 则向对应扇区发送类型为type1的关联重传帧。如果是, 则发送类型为type2的关联重传帧。随后等待接收关联入网帧。如果监听到一个空闲时隙, 则进一步判断碰撞扇区列表是否为空, 如果为空, 则该时段结束。如果不为空, 则继续提取首项进行相应操作。如果收到关

联入网帧, 则发送关联入网回复帧并继续监听该扇区其他DEV发送的关联入网帧。

(c) 未入网的DEV定向监听PNC。如果收到关联重传帧, 采用“反向监听偏移重发机制”进行反向监听: 如果监听到其他节点向PNC发送的关联请求帧, 将波束方向转向PNC, 待收到PNC发送的关联回复后, 再重新监听; 如果没监听到其它节点发送的信息, 则向PNC发送关联请求帧。收到PNC发的关联请求回复帧之后, 旋转波束方向以接收波束成形训练帧。如果DEV在该时段关联失败, 则在数据传输阶段退避式入网, 该操作可分布在多个超帧中进行。

(3)Beamforming CTAP时段: 该时段的主要目的是完成各DEV之间的波束赋形训练。根据“全网波束赋形训练机制”, 最后一个关联入网的DEV按扇区序号依次在每个扇区重复发送 S 个精简定向训练帧, 其他的DEV旋转接收定向帧并存储波束方向以及对应的DEVID。如果收到的DEVID比本节点的ID大“1”, 则根据帧中的信息设置发送偏移计时器 offset_3 。待当前节点发送完毕后, 本节点开始扫描发送定向训练帧。如果收到的DEVID为“1”, 则设置 offset_4 。待当前节点发送完毕后, 本节点将波束方向对准PNC以接收定向Beacon帧。DEVID为“1”的节点发送完毕后将波束方向对准PNC。

3.2.1.2 数据传输阶段

(1)D-Beacon时段: 该时段的主要目的是发送和接收信标帧。PNC向每个存在DEV的扇区发送定向Beacon帧, DEV收到后提取出帧中包含的信息。根据“机会性复用定向Beacon子时段机制”, 如果DEV在某一超帧的CAP时段监听到其他扇区节点发送的时隙请求帧, 记录序号seq。在PNC监听到本扇区时, 本节点发送复用位(使用保留位)置一的时隙请求帧。PNC收到后, 如果同时满足3个条件: (a)下一超帧的CTAP已无空闲时隙; (b)该节点申请的帧长不大于定向Beacon帧帧长; (c)目的地列表中存在与本DEV同扇区且距PNC较远的节点, 则将发送携带对应目的ID(时隙请求帧中的Reason code域)且Beacon复用位(使用保留位)置1的时隙请求帧。DEV收到后在下一超帧的对应Beacon子时段(根据序号确定)向对应目的地发送一个数据帧。

(2)CAP时段: 该时段的主要目的是DEV与PNC交互时隙请求信息。PNC依次监听每个存在DEV的扇区发送的时隙请求帧, 并及时向对应DEV发送时隙请求回复帧。根据“机会性复用S-CAP子时

段机制”，如果DEV在某一超帧的CAP时段监听到其他扇区节点发送的时隙请求帧，记录序号seq。在PNC监听到本扇区时，本节点发送复用位(使用保留位)置1的时隙请求帧。PNC收到后，如果同时满足3个条件：(a)下一超帧的CTAP已无空闲时隙；(b)该节点申请的帧长不大于时隙请求回复帧帧长；(c)目的地列表中存在与本DEV同扇区且距PNC较远的节点，则将发送携带对应目的ID(时隙请求帧中的Reason code域)且S-CAP复用位(使用保留位)置1的时隙请求帧。DEV收到后在下一超帧的对应S-CAP子时段向对应目的地发送一个数据帧。

(3) CTAP时段：该时段的主要目的是传输数据帧。网络中所有节点按照定向Beacon帧的调度发送或接收数据帧。

3.2.2 动态模式

动态模式用“超帧”来划分网络运行时间，一个超帧包含Quasi-omni Beacon, CAP和CTAP时段，其中CAP时段又分为Association S-CAP和Regular S-CAP两个子时段。CTAP时段由多个CTA子时段组成。

3.2.2.1 Quasi-omni Beacon时段

该时段的目的是发送和接收信标帧。“机会性复用定向Beacon子时段”机制在该时段运行。

3.2.2.2 CAP时段

在该时段，未入网节点与PNC交互关联入网消息，已入网节点与PNC交互时隙请求和回复消息。“机会性复用S-CAP子时段”新机制在该时段运行。

3.2.2.3 CTAP时段

该时段供节点进行数据传输。“基于历史信息快速回帧”新机制在该时段运行：每个源节点在Beamforming CTA子时段开始时判断自己是否与目的节点进行过波束赋形训练？如果是，则该节点从节点扇区天线信息表中记录的数据帧目的节点所在扇区开始进行扇区扫描(扇区扫描指在每个扇区发送波束训练帧的操作；通常是依顺序进行发送，在每个扇区发送的波束训练帧数等于扇区总数)；在发送第1个波束训练帧后，暂停发送，在该扇区监听一段时间，监听时长为预先确定的用于接收1个波束训练帧所用时间，等待目的节点发来波束训练帧；如果收到，则从该波束训练帧中提取出天线信息，结束波束赋形训练；如果未收到，则继续进行波束扫描发送等操作。

3.3 性能分析

关于AD-MAC的性能，有如下引理：

引理 1 相较于3c, ad和ENLBT-MAC, AD-

MAC协议所需的波束赋形训练开销更小。

证明 3c和ad的MAC协议进行波束训练时，一条链路的发送端向PNC请求两个时隙，其中一个时隙用于两个节点之间的波束赋形训练，后一个时隙用于两个节点之间的数据传输。ENLBT-MAC所做的改进是在前一个时隙中，网络中所有节点进行扫描监听并指向对应节点的最佳波束方向。AD-MAC的波束训练是：节点按照入网顺序从后往前依次发送波束训练帧，其他节点进行扫描监听。

静态模式：假设网络中每个节点都需要需其他 $m-1$ 个节点(不包括PNC)进行通信。设 C_{3c} , C_{ad} , C_{en} 和 C_{AED} 分别表示3c, ad, ENLBT-MAC和AD-MAC在相同网络拓扑下所需要发送的波束训练开销总数(单位：bit)，其中 α 表示3c波束训练帧帧长， β 表示ad和ENLBT-MAC的波束训练帧帧长， γ 表示AD-MAC的波束训练帧帧长；有

$$C_{3c} = [(m-1) + (m-2) + \dots + 1] \times (S^2 + S) \times \alpha = \alpha m(m-1)(S^2 + S) \quad (1)$$

$$C_{ad} = [(m-1) + (m-2) + \dots + 1] \times (S^2 + S) \times \beta = \beta m(m-1)(S^2 + S)/2 \quad (2)$$

$$C_{en} = [S^2 + (m-1)S + \dots + S^2 + S] \times \beta = [(m-1)S^2 + m(m-1)S/2] \times \beta \quad (3)$$

$$C_{AED} = mS^2 \times 32 = \gamma mS^2 \quad (4)$$

由于 $\alpha > \beta > \gamma$ ，则 $C_{ad} > C_{3c} > C_{en} > C_{AED}$ 。

动态模式：在ENLBT-MAC中，节点C监听A与B的波束赋形训练。假设C需要与A进行波束赋形训练时，A与C相对位置发生变化的概率为50%，没变化的概率为50%。则ENLBT-MAC, ad和3c此次的控制开销：

$$C_{en} = [50\%S + 50\%(S + S^2 + S)] \times \beta = 0.5S\beta(3 + S) \quad (5)$$

$$C_{3c} = \alpha(S^2 + S) \quad (6)$$

$$C_{ad} = \beta(S^2 + S) \quad (7)$$

则 $C_{ad} > C_{3c} > C_{en}$ 。证毕

假设A与B再次波束赋形训练时相对位置发生变化的概率为50%、没变化的概率为50%。则AD-MAC此次的控制开销：

$$C_{AED} = [50\%(S^2 + S) + 50\% \times 1] \times \gamma = 0.5\gamma(S^2 + S + 1) \quad (8)$$

则 $C_{ad} > C_{3c} > C_{en} > C_{AED}$ 。证毕

引理 2 相较于3c, ad和ENLBT-MAC, AD-MAC协议能够有效降低节点入网碰撞概率。

证明 3c, ad和ENLBT-MAC的入网操作是：

节点收到定向Beacon后,在当前超帧对应关联子时段向中心节点发送关联入网帧并设置一个定时器。如果在定时器计时范围内收到中心节点发送的关联入网回复帧,则节点入网完毕。如果定时器到期,节点则会执行二进制指数退避算法。如果该子时段结束,退避计时器挂起待到下个超帧对应的子时段再开启。为简化计算,本文将子时段的长度设置为普通节点与中心节点交互一个关联消息的时间。设 $p_1 = 1/S$,则在3c, ad和ENLBT-MAC中,网络在第1个超帧关联入网时的碰撞概率 p_2 的表达式为

$$p_2 = p_1 + C_3^2 p_1^2 + C_4^2 p_1^3 + \cdots + C_{n+1}^2 p_1^n \quad (9)$$

其中, $C_{n+1}^2 p_1^n$ 表示网络中存在 $n+1$ 个普通节点,其中至少有两个节点在同一扇区的概率。

而AD-MAC将PNC的每个扇区又划分为 m 段($m \geq 2$)。设 $p_3 = 1/mS$,则在AD-MAC中,网络在第1个超帧关联入网时的碰撞概率 p_4 的表达式为

$$p_4 = p_3 + C_3^2 p_3^2 + C_4^2 p_3^3 + \cdots + C_{n+1}^2 p_3^n \quad (10)$$

则由式(9),式(10)可知, $p_3 < p_1 \Rightarrow p_4 < p_2$ 。
证毕

4 仿真

为定量验证AD-MAC协议的性能,本文通过仿真建模实现了IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad, ENLBT-MAC和AD-MAC协议的关键机制,并对它们的性能进行了定量的比较和分析,仿真结果验证了AD-MAC协议的正确性和有效性。

4.1 统计量定义

(1)平均入网时延:入网时延=节点收到关联回复帧的时刻-节点第1次发送关联请求的时刻,平均入网时延=所有节点的入网时延之和/节点数。

(2)波束训练开销:波束训练开销=1 s内所有节点发送的波束训练帧的比特数之和。

(3)MAC层吞吐量:MAC层吞吐量=单位时间内网络中所有节点的MAC收到的比特数之和。

(4)平均数据延迟:数据延迟=目的节点收到数据包的时刻-源节点发送数据包的时刻,平均数据延迟=所有包的数据时延之和/包的个数。

4.2 仿真设置

使用仿真软件平台OPNET14.5模拟在10 m × 10 m平面拓扑中随机放置节点形成的无线个域网。PNC位于网络中心(5, 5)处。根据节点数不同和节点是否移动分别设置了10个仿真场景,动态与静态场景的公共仿真参数如表1所示。

设置5个仿真场景,在场景中节点分布处于静

表 1 公共仿真参数

参数(单位)	数值
节点数目(个)	4,7,10,13,16
波束宽度(°)	5
传输速率(Gbps)	10
收发端距离(m)	10
仿真时间(s)	10
超帧周期(ms)	10
节点缓存(Mb)	10
发包间隔(ms)	0.08
数据帧长(bit)	64000

态和动态;节点数量分别为4, 7, 10, 13, 16, 包含两个节点的扇区数量分别为0, 1, 2, 3, 4。

4.3 仿真结果分析

(1)波束训练开销:从图1中的波束训练开销结果可以看出,随着节点数的增加,各种协议的波束训练开销都有所增加;与3c, ENLBT-MAC和ad相比,AD-MAC在网络饱和情况下降低了波束训练开销21.84%(节点数=16:(6.4109-5.0104)/6.4109≈0.2184),仿真结果与引理1分析结果一致;其原因主要是3c, ad在波束训练时隙中只有一条链路的收发节点进行扫描发送/扫描接收操作,ENLBT-MAC在波束训练时隙中其他节点始终处于扫描接收操作;而AD-MAC采用全网波束赋形训练机制使得节点根据入网顺序从后往前依次扫描发送进行节点间的波束训练,避免了以链路为单位的重复训练,从而有效地减少了波束训练开销。在动态场景中,AD-MAC在网络饱和情况下降低了波束训练开销18.71%(节点数=16:(361.95-294.23)/361.95≈0.1871)。分析其原因主要是AD-MAC采用基于历史信息快速回帧机制减少了原协议中收发节点相对位置不变情况下的冗余波束赋形训练。

(2)平均入网时延:从图2可看出,在碰撞扇区数不为“零”的各静态场景中AD-MAC的平均入网时延至少比IEEE 802.15.3c, ENLBT-MAC和IEEE 802.11ad降低22.70%(节点数=16:(2.2825-1.7644)/2.2825≈0.2270)。在碰撞扇区数不为“零”的各动态场景中AD-MAC的平均入网时延比IEEE 802.15.3c, ENLBT-MAC和IEEE 802.11ad降低13.07%。分析其原因主要是IEEE 802.15.3c, ENLBT-MAC和IEEE 802.11ad在节点发送入网请求消息时均采用CSMA/CA方式接入信道,而且碰撞避免方式均为定向监听目的节点。该监听方式只能反映目的节点是否在特定方向上是否

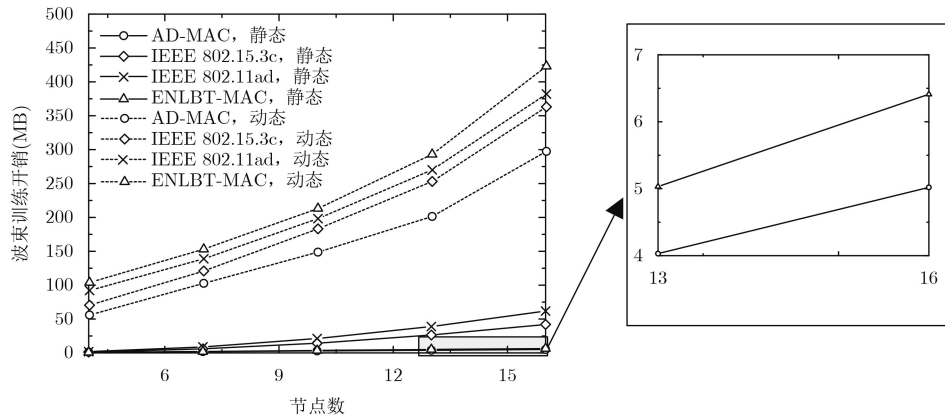


图1 波束训练开销比较

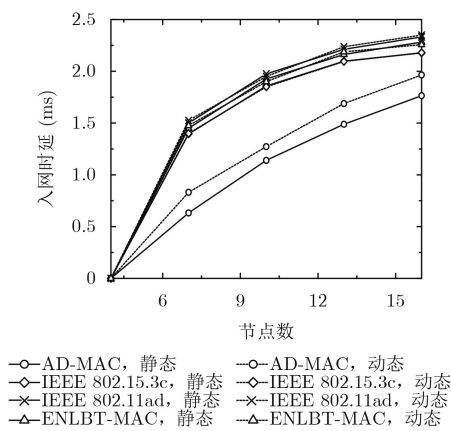


图2 平均入网时延比较

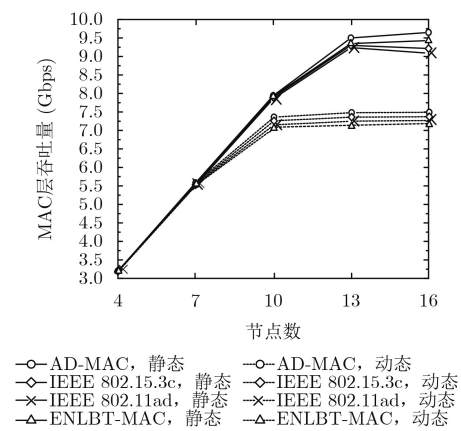


图3 MAC层吞吐量比较

发送消息,无法反映在该特定方向上是否有其他节点给目的节点发送消息。AD-MAC采用反向监听偏移重发机制实现了距PNC较远的节点发送消息而较近的节点退避发送的效果,从而有效地降低了平均入网时延。

(3)MAC层吞吐量:由图3可知,在静态网络负载还未饱和(节点数=4, 7, 10)的情况下,各种协议的MAC层吞吐量随着网络节点数的增加而线性增加;与IEEE 802.15.3c, ENLBT-MAC和IEEE 802.11ad相比,AD-MAC在静态网络饱和和情况下增长了MAC层吞吐量2.38%(节点数=16:($9.6579-9.4336$)/ $9.4336 \approx 0.0238$);AD-MAC在动态网络饱和和情况下增长了MAC层吞吐量1.60%(节点数=16:($7.4835-7.3652$)/ $7.3652 \approx 0.0160$);分析其原因主要是IEEE 802.15.3c和IEEE 802.11ad在网络负载饱和时只能拒绝部分节点的时隙请求,导致部分源节点推迟发包或者丢弃包;而AD-MAC采用机会性复用定向Beacon子时段机制和机会性复用S-CAP子时段机制使得整个网络在超帧的Beacon时段和S-CAP时段发送了部分数据包,从而提升了MAC层吞吐量。

(4)平均数据帧延迟:如图4所示,4种协议的

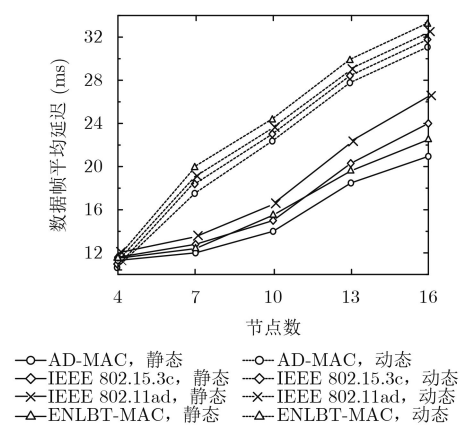


图4 平均数据帧延迟比较

平均数据帧延迟在每个场景下相差不大,随着节点数的增加,都出现了上升趋势;分析其原因是随着网络中节点增加,中心节点接收到的时隙申请也增加,平均每个节点被安排的时隙也推后。各个场景中AD-MAC的平均数据帧延迟均低于其他3种协议,主要原因是AD-MAC采用机会性复用定向Beacon子时段机制和机会性复用S-CAP子时段机制使得部分数据包提前发送,从而降低了平均数据帧延迟。

5 结束语

作为一种大容量数据传输技术,太赫兹通信在超高速无线个域网、纳米网中得到较为广泛的研究,但现有相关定向MAC协议在波束训练开销和入网时延方面尚存不足,为此,本文提出一种新的太赫兹定向MAC协议,采用基于历史信息快速回复波束训练帧、全网节点协同波束训练和反向监听等新机制对其进行解决,效果在理论分析和仿真中得到了验证。在接下来的工作中,将在本文所述协议的基础上研究太赫兹无线个域网的数据帧定向并行传输,进一步提升信道利用率和网络吞吐量。

参 考 文 献

- [1] GE Xiaohu, TU Song, MAO Guoqiang, *et al.* 5G ultra-dense cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(1): 72–79. doi: [10.1109/MWC.2016.7422408](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422408).
- [2] 张健, 邓贤进, 王成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 1–13. doi: [10.11805/TKYDA201401.0013](https://doi.org/10.11805/TKYDA201401.0013).
ZHANG Jian, DENG Xianjin, WANG Cheng, *et al.* Terahertz high speed wireless communications: Systems, techniques and demonstrations[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(1): 1–13. doi: [10.11805/TKYDA201401.0013](https://doi.org/10.11805/TKYDA201401.0013).
- [3] WANG Pu, JORNET J M, MALIK M G A, *et al.* Energy and spectrum-aware MAC protocol for perpetual wireless nanosensor networks in the terahertz band[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(8): 2541–2555. doi: [10.1016/j.adhoc.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.07.002).
- [4] MUMTAZ S, JORNET J M, AULIN J, *et al.* Terahertz communication for vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5617–5625. doi: [10.1109/TVT.2017.2712878](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2712878).
- [5] YAO Xinwei and JORNET J M. TAB-MAC: Assisted beamforming MAC protocol for terahertz communication networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2016, 9: 36–42. doi: [10.1016/j.nancom.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.nancom.2016.07.003).
- [6] 任智, 游磊, 吕昱辉, 等. 高时隙利用率太赫兹无线个域网公平接入协议[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10): 2339–2345. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.27).
REN Zhi, YOU Lei, LÜ Yuhui, *et al.* High-slot-utilization and fair access protocol for terahertz wireless personal area networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(10): 2339–2345. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.27).
- [7] CAO Jianling, WANG Min, CHEN Cong, *et al.* High-throughput low-delay MAC protocol for terahertz ultra-high data-rate wireless networks[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2016, 23(4): 17–24. doi: [10.1016/S1005-8885\(16\)60041-9](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(16)60041-9).
- [8] SHAHRAM M, MICHELE C W, and SAJAL K D. DRIH-MAC: A distributed receiver-initiated harvesting-aware MAC for nanonetworks[J]. *IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications*, 2015, 1(1): 97–110. doi: [10.1109/TMBMC.2015.2465519](https://doi.org/10.1109/TMBMC.2015.2465519).
- [9] KEN H, TORU T, MAKOTO Y, *et al.* Modifications to the draft TG3d ARD after the July 2014 meeting[OL]. <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0528-00-003d-modification-of-tg3d-ard-after-july-meeting.docx>. 2014.
- [10] BILE P, SEBASTIAN P, and THOMAS K. Fast beam searching concept for indoor terahertz communications[C]. The 8th European Conference on Antennas and Propagation, Hague, Netherlands, 2014: 639–643. doi: [10.1109/EuCAP.2014.6901840](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6901840).
- [11] WANG Junyi, ZHOU Lan, PYO C W, *et al.* Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1390–1399. doi: [10.1109/JSAC.2009.091009](https://doi.org/10.1109/JSAC.2009.091009).
- [12] IEEE Standard 802.15.3c-2009. 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]. IEEE Computer Society, 2009.
- [13] IEEE 802.11ad-2012. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications amendment 3: enhancements for very high throughput in the 60 GHz band[S]. IEEE Computer Society, 2012.
- [14] AKHTAR A and ERGEN S C. Efficient network level beamforming training for IEEE 802.11 ad WLANs[C]. International Symposium Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems, Chicago, USA, 2015: 1–6, doi: [10.1109/SPECTS.2015.7285289](https://doi.org/10.1109/SPECTS.2015.7285289).
- [15] CHONG Han, TONG Wenqian, and WU Xinyi. A memory-assisted MAC protocol with angular-division-multiplexing in terahertz networks[C]. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks, Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7997014](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997014).

任 智: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为太赫兹无线个域网和机会网络。

吕昱辉: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为太赫兹无线个域网定向MAC协议。

徐兆坤: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为太赫兹无线个域网定向并行MAC协议。

邹明芮: 女, 1986年生, 助理研究员, 博士, 研究方向为太赫兹无线网络MAC层协议。

田洁丽: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为太赫兹无线个域网跨PAN数据传输。