



专题: 5G+6G

太赫兹无线组网: 原理、现状与挑战

周天航¹, 杨闯¹, 刘子乐¹, 彭木根¹, 于丽²

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;
2. 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 为实现超高速率和巨容量, 太赫兹通信成为 6G 重要技术选项之一。重点介绍了太赫兹通信在室内、室外等典型场景的应用及性能需求, 并立足太赫兹无线组网需求, 详细介绍了网络拓扑、媒体接入控制(media access control, MAC) 层协议和邻居节点发现等关键核心技术的最新研究进展。最后, 探讨了太赫兹无线组网面临的挑战, 描述了未来可能的研究方向。

关键词: 太赫兹通信; 组网; 媒体接入控制

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021122

Terahertz wireless networking: principles, status and challenges

ZHOU Tianhang¹, YANG Chuang¹, LIU Zile¹, PENG Mugen¹, YU Li²

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: To achieve huge capacity, terahertz communication has become an important technical option for 6G. Application and performance requirements of terahertz communication in typical indoor and outdoor scenarios were introduced emphatically. Then, based on the requirements of terahertz wireless networking, the research progress of key technologies such as topology design, media access control (MAC) layer protocol and neighbor discovery were summarized in detail. Last but not least, the challenges of terahertz wireless networking were discussed, and the possible future research directions were described.

Key words: terahertz communication, networking, MAC

1 引言

随着 5G 移动通信商业化进程加快, 世界各国

已逐渐开启下一代移动通信技术研究, 如 AI 使能 6G 智简接入网技术和意图驱动网络技术^[1]。在当前 sub-6 GHz 和 5G 毫米波频段, 这些技术仅能实

收稿日期: 2021-05-01; 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61925101, No. 61831002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61925101, No. 61831002)



现 Gbit/s 量级通信速率^[2], 无法满足 6G 速率需求。未来局域网和个域网速率将达到几十 Gbit/s; 虚拟现实 (virtual reality, VR) 流畅运行的最低速率高达 10 Gbit/s; 高清视频和 3D 视频传输速率分别高达 24 Gbit/s 和 100 Gbit/s。容量方面, 未来 6G 网络将支持万亿量级的设备连接, 与 5G 相比提高 10~1 000 倍。为满足 6G 通信速率和容量需求, 拥有海量带宽资源的太赫兹 (0.1~10 THz) 和可见光通信备受关注, 均成为 6G 关键候选频谱技术。目前, 太赫兹大功率器件和大规模阵列等核心通信硬件尚存在缺陷, 使得室内场景下可见光具备覆盖范围更广的优势。而相比可见光通信, 太赫兹可实现点对多点覆盖、穿透云雾和尘埃, 且抗干扰能力强。因此太赫兹室内多点接入和室外通信技术成为国内外研究热点。

2013 年美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DAPRA) 在 0.5 m 范围内实现了世界上最高速率太赫兹通信, 载波频率 100 GHz, 速率 200 Gbit/s^[3]; 2017 年中国工程物理研究院实现世界上最远距离太赫兹通信, 载波频率 140 GHz, 距离 21 km, 速率 5 Gbit/s^[4]。但受制于太赫兹射频器件发射功率低、大规模天线阵列增益低, 这些研究无法支撑大规模多输入多输出 (massive multiple-input multiple-output, Massive MIMO) 通信^[5], 使得面向太赫兹窄波束定向天线的新型无线组网技术成为当今研究热点

和难点。

本文首先介绍了太赫兹通信的应用场景及需求, 包括室内组网和室外组网; 然后面向场景需求, 从拓扑结构、媒体接入控制 (media access control, MAC) 层协议和邻居节点发现等窄波束通信关键技术角度综述了太赫兹无线组网的研究现状; 最后分析讨论了当前太赫兹无线组网面临的问题与挑战, 描述了未来可能的研究方向。

2 太赫兹无线组网应用场景

太赫兹无线组网性能需求见表 1, 太赫兹无线组网分为室内和室外两种场景。这些场景在覆盖范围、数据速率、时延、连接性和误码率 (bit error rate, BER) 方面均有差异。这些差异主要取决于 6G 网络节点连接的深度: 6G 无线通信网络面向全业务, 针对不同组网场景确定更加开放的网络架构, 实现通信、感知、计算能力的融合。在此基础上, 万物连接与交互性构成了网络节点的深度连接^[6]。

2.1 室内应用场景

室内太赫兹无线组网场景可根据覆盖范围大小分为太赫兹无线局域网 (terahertz wireless local area network, TLAN)、太赫兹无线个域网 (terahertz wireless personal area network, TPAN) 和信息淋浴 (information shower, IS) 3 类场景。

TLAN 和 TPAN 场景如图 1 所示^[11], 覆盖

表 1 太赫兹无线组网性能需求

类别	场景	覆盖	速率	时延	连接性	目标 BER
室内应用	信息淋浴 ^[7]	0.1~5 m	1 Tbit/s	秒级	点对点, 点对多点	—
	太赫兹局域网	<50 m	达 100 Gbit/s	<1 ms	点对点, 点对多点, Ad Hoc	10 ⁻⁶
	太赫兹个域网 ^[8]	<20 m	达 100 Gbit/s	<1 ms	点对点, 点对多点, Ad Hoc	10 ⁻⁶
室外应用	微型超密集蜂窝网	10~15 m	>100 Gbit/s	毫秒级	点对多点	10 ⁻¹⁰
	车联网和无人驾驶 ^[9]	>100 m	>100 Gbit/s	毫秒级	点对点, 点对多点, Ad Hoc	—
	军事通信	>100 m	10~100 Gbit/s	毫秒级	点对点, 点对多点, Ad Hoc	—
	空间组网 ^[10]	千米级	10~100 Gbit/s	秒级	点对点, 点对多点	—

范围需求分别为小于 50 m 和小于 20 m, 速率达 100 Gbit/s。与传统低频 WLAN 相比, 网络接入节点 (access point, AP) 可使用子阵列天线结构 (sub-array antenna structure) 同时向不同方向的多用户发送信息, 实现不同的网络接入设备 (如个人计算机、手机终端与智能可穿戴设备) 之间的高速率通信。IS 指在小于 5 m 的覆盖范围内, 满足一定移动性的前提下实现短距离 Tbit/s 量级通信, 主要针对文件和视频流等数据的预提取^[7]。

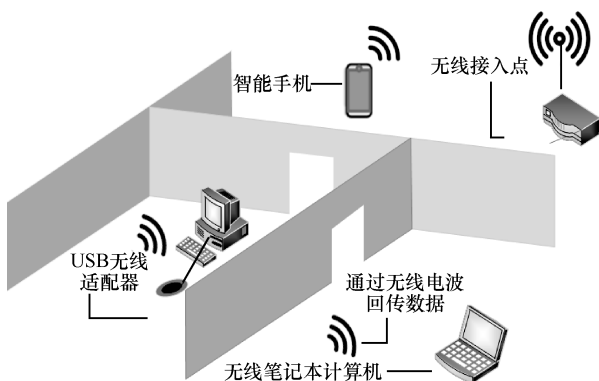


图1 TLAN 和 TPAN 场景^[11]

太赫兹无线组网能够为室内通信提供高速率和移动性保障, 显著提升室内高质量视频的传输能力, 例如高清全息视频会议、超高分辨率视频文件下载和 VR 技术应用等。然而节点移动性严重制约室内太赫兹通信链路的可靠性。

2.2 室外应用场景

室外太赫兹无线组网场景非常广泛, 包括超密集微小区、车联网、军事通信和空间通信等。

太赫兹蜂窝网覆盖场景如图 2 所示。太赫兹接入节点 (THz access point, THz-AP) 覆盖密集微小区, 覆盖范围达 10~15 m, 为诸如运动场、演唱会和旅游景点等热点地区的移动用户提供大规模高清直播、3D 全息通信等业务。太赫兹定向链路可用于微小区超高速无线回传, 提高网络吞吐量。可以预见, 由于太赫兹路径损耗大、热点地区网络节点密集且移动性高, 太赫兹超密集微小区仍需使用大规模天线阵列或其他新型网络设

备支持网络移动通信。为克服用户移动和非视距传输带来的问题, 未来太赫兹蜂窝网发展方向有两个: 借助智能天线和反射器, 将反射的太赫兹信号指向用户密度高的地区; 与低频融合组网, 利用宏基站实现低频覆盖、太赫兹定向链路实现高速率数据业务传输。

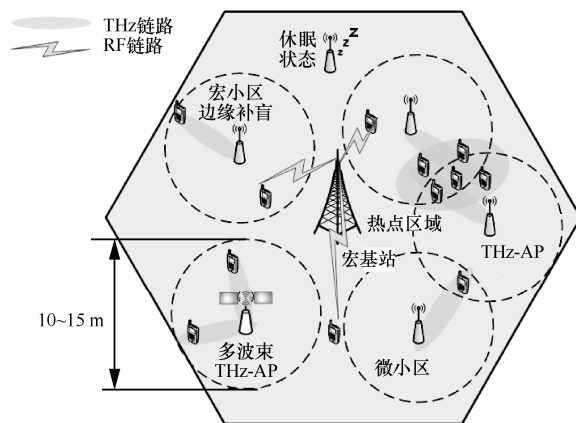
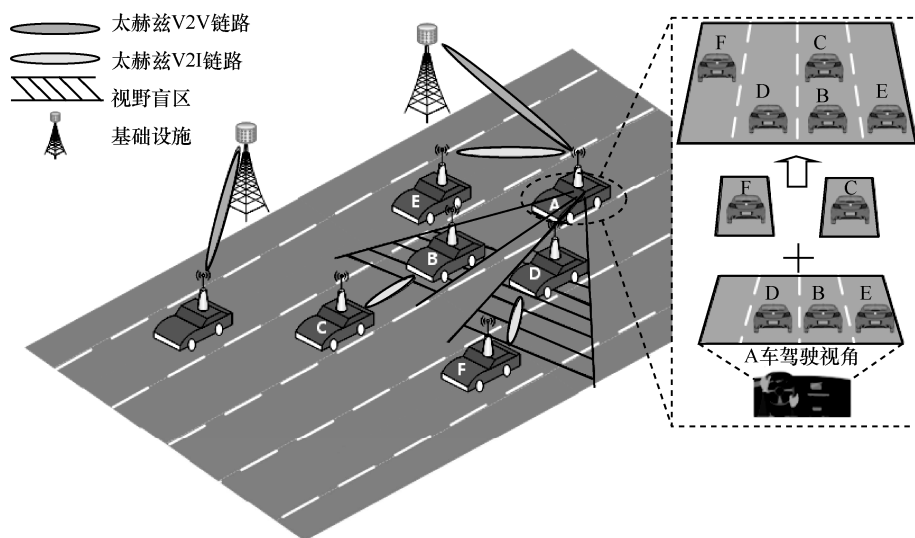


图2 太赫兹蜂窝网场景

太赫兹车联网通信场景如图 3 所示, 网络覆盖范围需求大于 100 m。作为面向 6G 的分布式网络, 除高速率和低时延需求外, 太赫兹车联网还需实现远距离通信和车辆高速移动管理, 亟须通过太赫兹组网提升网络性能。车辆在驾驶过程中需处理庞杂的地图和道路信息, 因此太赫兹车联网场景的突出特点之一是超短链路时延和庞大数据传输共存。太赫兹车联网按业务类型可分为车-车 (vehicle to vehicle, V2V) 场景和车-设施 (vehicle to infrastructure, V2I) 场景。在 V2V 场景中, 相邻车辆之间可通过太赫兹链路实现感知信息共享^[12], 车辆利用共享信息建立自身周边交通情况的卫星视图, 显示盲点区域的隐藏物体, 从而避免与其他车辆和人员的碰撞。在 V2I 场景中, 基础设施单元能够收集有关车辆和周边交通的感应数据, 其通信和回传链路性能可通过太赫兹通信得到改善。谷歌自动驾驶汽车以 750 Mbit/s 的速率生成传感器数据, 并且在一次行程中生成约 1 TB 的数据量^[13], 传输和处理

图3 太赫兹车联网场景^[12]

这些数据量需要通过太赫兹组网实现超高速通信网络，以提高通信效率并降低网络时延。

太赫兹军事通信场景如图4所示，覆盖需求大于100 m，传输速率达10~100 Gbit/s。在现代战争中，无人机（unmanned aerial vehicle, UAV）在战斗和侦察情况下代替人类飞行员进行一系列危险动作^[14]，组建战场指挥网络。太赫兹高速率和大容量特性将支持无人机网络将高清无损视频实时传输至作战指挥中心，协助作战单位更好地分析战场形势。此外，在战场和恶劣环境中，军用车辆和飞行器需要传输大量保密数据，协助其他网络设备执行攻击或侦察，太赫兹窄波束特性可保证这些数据的安全性。



图4 太赫兹军事通信场景

空天地一体化组网场景如图5所示^[10]。空天地一体化作为6G“泛在覆盖”通信网络的核心场景，已被业内重点研究^[15-16]。太赫兹能够穿透大气层、高速飞行器外部包裹的等离子体鞘层，适用于星间高速通信和星地间高速通信。相比毫米波，太赫兹具备更大的带宽和更快的传输速率；相比激光，太赫兹空间链路衰减更小。未来太赫兹通信设备有望实现小型化、平面化，易于无人机和卫星等携带，推动空天地一体化组网通信。

3 太赫兹无线组网研究现状

太赫兹无线组网主要聚焦3个关键技术：拓扑控制、MAC层协议设计和邻居节点发现。太赫兹组网研究现状见表2，根据拓扑结构，可分为集中式和分布式；根据接入方式，分为随机多址接入、固定多址接入、混合多址接入。性能指标主要有速率、时延、吞吐量和丢包率等。

3.1 拓扑控制

3.1.1 集中式拓扑

集中式拓扑的优势在于AP（如基站）能够发挥集中处理优势，高效分配网络资源和实施多用户调度，提升网络的整体性能。参考文献[18]提出

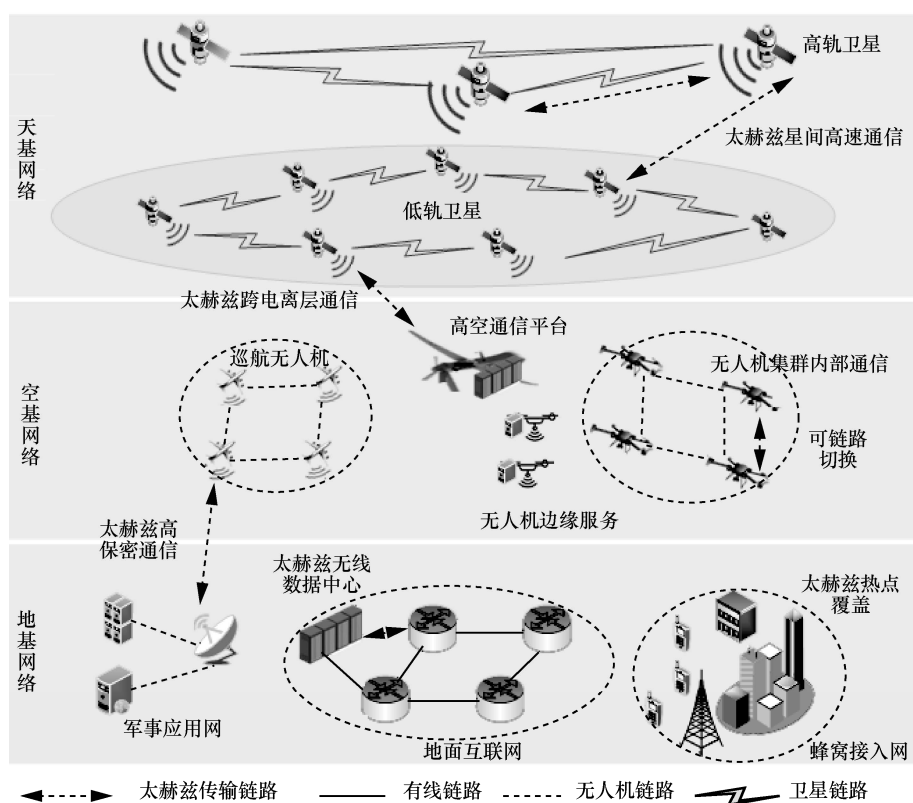
图 5 空天地一体化组网场景^[10]

表 2 太赫兹组网研究现状

年份	参考文献	频段	拓扑	多址方式	邻居节点发现	仿真工具	性能指标
2014 年	参考文献[17]	0.1~10 THz	分布式	TDMA	有	custom	数据速率、吞吐量
2017 年	参考文献[8]	340 GHz	集中式	混合	有	OPNet	时延、吞吐量、队列溢出概率
	参考文献[18]	0.06~10 THz	集中式	固定、多频段	无	custom	吞吐量、数据速率、时延、中断概率
	参考文献[19]	2.4 GHz, 0.1~10 THz	分布式	随机、多频段	有	蒙特卡洛	时延、吞吐量、中断概率
2018 年	参考文献[20]	1.034 5 THz	分布式	CSMA	无	custom	吞吐量、最佳距离
	参考文献[21]	0.1~10 THz	分布式	FTDMA	无	custom	均匀性、随机性、吞吐量、BER、汉明相关性
	参考文献[9]	毫米波, 0.1~10 THz	分布式	固定、多频段	无	custom	数据传输速率
2021 年	参考文献[22]	1.04 THz	分布式	CSMA	无	NS-3	包传输成功概率、数据时延、吞吐量

了一种使用太赫兹链路的集中式拓扑。在该网络中, AP 使用定向天线进行节点发现扫描、初始化链路访问和数据传输; 用户节点首先采用全向天线与 AP 建立高效关联, 然后切换为定向天线进

行高速数据传输。接入方面, 该文献讨论了一种波束交换接入技术, 能够在链路初始化接入和信息传输中周期性地波束对准, 有效降低全向天线和定向天线切换所造成的时延。此外, 该文



献还提出利用本地存储, 提高 AP 扫描效率, 实现 AP 与用户节点快速建立连接并调度节点间的数据传输。然而该网络的问题在于天线切换增加了来自相邻节点干扰和碰撞的概率, 影响节点间的同步效果。为克服同步问题, 参考文献[8]提出设置一个微型网络协调器 (piconet coordinator, PNC) 向附近的设备发送时间同步信息, 集中进行调度和访问控制。

这些研究表明, 集中式太赫兹组网拓扑主要问题在于 AP 集中管理和频繁节点切换带来高控制开销和高时延, 亟须提出高效波束管理和节点接入方案。

3.1.2 分布式拓扑

分布式拓扑网络结构具有灵活性高、自组织能力强等特点, 是未来太赫兹无线组网的应用拓扑模型之一。在分布式太赫兹无线网络场景下, 网络的时变性会造成网络拓扑的频繁变化, 需要相应的控制协议进行管理。参考文献[9]考虑基于软件定义网络 (software defined network, SDN), 根据距离切换通信频率, 为太赫兹无线组网提供了一种新型思路, 即微波、毫米波、太赫兹波融合覆盖和信道接入; 参考文献[19]提出了定向天线与全向天线协同使用的分布式拓扑, 控制信号使用 2.4 GHz 链路而数据传输使用太赫兹通信链路。然而, 这些多频段通信方案会增大设备成本和切换时延。参考文献[22]提出了一种具有高速率太赫兹通信链路的无线网络, 其网络节点分布在 10 m 的圆形范围内, 通过接收端发起握手协议, 降低网络时延和丢包率; 参考文献[21]中针对不同的室内接入子网, 提出了一种智能安全的频谱控制策略, 节点通过自适应选择子频率实现抗干扰。但这些拓扑面临窄波束引起的接入耳聋问题。

这些研究表明, 由于缺乏统一调度, 且使用窄波束进行数据传输, 分布式太赫兹网络面临耳聋问题、节点同步问题, 亟须从高效 MAC 层设计角度实现突破。

3.2 MAC 层协议设计

MAC 层通过流量控制和多路复用, 控制物理层硬件和无线传输介质之间的交互, 其协议设计和标准化是太赫兹无线组网的重要组成部分。鉴于传统 IEEE 802.11 协议无法解决太赫兹窄波束带来的传输问题, 适用于太赫兹 MAC 层的标准化协议一直是研究热点。2008 年, IEEE 已开始对太赫兹通信展开标准化研究, 并于 2014 年成立 100 GHz 无线任务组 (TG100 GHz), 提出首个太赫兹波段无线通信标准 IEEE Std.802.15.3d-2017。该标准于 2017 年被正式批准使用, 频段覆盖 253~322 GHz, 带宽为 IEEE 69 GHz。但与 IEEE 802.11 和其他 WLAN 协议不同, IEEE 802.15.3d 仅支持点对点通信, 无法满足太赫兹组网中节点移动和多址接入的需求。

除了标准化协议以外, 对于太赫兹网络 MAC 层协议的研究可根据多址接入机制分为随机多址、固定多址以及混合多址接入。

(1) 随机多址接入的优势在于控制开销低。参考文献[20]基于 CSMA 考虑了太赫兹信道和定向天线对不同层级之间的跨层影响, 研究了实现网络最大吞吐量的中继距离, 但未充分考虑高网络节点密度; 参考文献[22]针对太赫兹网络提出了一种基于单向握手的载波监听多址接入 (carrier sense multiple access, CSMA) 方案, 使处于传输状态的节点能够侦听来自其他节点的信息, 但没有考虑定向天线波束对准问题。

(2) 固定多址接入主要应用频、时分。参考文献[21]提出使用频时分址接入 (frequency-time division multiple access, FTDMA) 技术, 在不同时隙中频率被分为若干个子载波, 且每个用户所使用的子载波正交, 未忽略太赫兹频段的路径损耗和噪声影响。参考文献[17]则使用了基于时分多址接入 (time division multiple access, TDMA) 的多址机制, 并提出了一种用于太赫兹通信链路的定向 MAC 协议, 应用脉冲级波束交换和能量控

制,但开销过大。此外,参考文献[9]还讨论了车载通信场景基于 TDMA 的信道接入方案,该方案使用 SDN 在毫米波和太赫兹波段之间进行切换,从而实现高宽带的数据传输,同样存在开销过大的问题。

(3) 在混合多址接入中,参考文献[8]基于 IEEE 802.15.3c 协议使用冲突避免的载波侦听的多址接入(carrier sense multiple access with collision avoid, CSMA/CA)和 TDMA 的混合接入方案。信息传输由多个超帧(Superframe)实现,每个超帧由信标(BP)、信道访问帧(CAP)、信道时间分配帧(CTAP)组成。CAP 时期依据 CSMA/CA 进行信道接入;CTAP 时期则通过 TDMA 对网络设备进行时隙分配。该方案能够提高网络吞吐量并减小数据时延,但仍面临节点发现困难的问题。

3.3 邻居节点发现

太赫兹组网场景中,网络节点在进行定向数据传输前需确知邻居节点位置以完成波束成形和对准。因此高效的网络邻居节点发现是太赫兹通信链路建立的前提。截至目前,主流方案有两种。

(1) sub-6 GHz 和太赫兹融合通信^[19]

该方案分成两个阶段:首先使用 sub-6 GHz 全向天线进行数据广播并获取位置信息;然后通过位置信息利用太赫兹定向天线进行波束对准和数据传输。然而频繁切换严重增加设备成本和控制开销。

(2) 基于窄波束定向天线的节点扫描和发现
传统穷搜式的扫描方案会导致高时延,甚至造

成通信中断。参考文献[23]利用启发式算法,提出了一种适用于毫米波定向波束的快速扫描算法,利用先前的有效链路信息对可行扇区进行搜索,并自适应地增加扇区搜索空间来新建通信链路。相比穷搜扫描,减小了搜索空间,大幅降低链路建立时延。对太赫兹网络节点发现具有良好的借鉴意义。参考文献[24]则针对太赫兹组网提出了一种创新性的邻居节点发现方式,利用天线发射的旁瓣信息加速邻居节点的发现过程。在矩形室内空间测试表明,利用旁瓣信息辅助节点发现算法相比无旁瓣信息的发现方案,节点发现速率提高近 100 倍。然而无论是启发式算法还是利用旁瓣信息的节点发现算法,都依赖于定向天线的高速旋转,实施难度极大。

4 问题与挑战

研究现状表明,太赫兹传输特性是组网问题的根源(太赫兹传输特性、组网问题、技术挑战关系如图 6 所示)。本节从太赫兹传输特性出发,讨论太赫兹无线组网面临的问题及其技术挑战,进一步从各层级协议和网络策略的角度指出突破太赫兹组网瓶颈的技术发展方向。

4.1 面临的问题

(1) 链路初始化时延高

在太赫兹无线组网场景下,高度定向天线不仅带来节点与信道感知问题,同时还给链路初始化建立带来挑战。参考文献[25]利用 TeraSimns-3 太赫兹端到端网络仿真工具对移动网络场景下毫

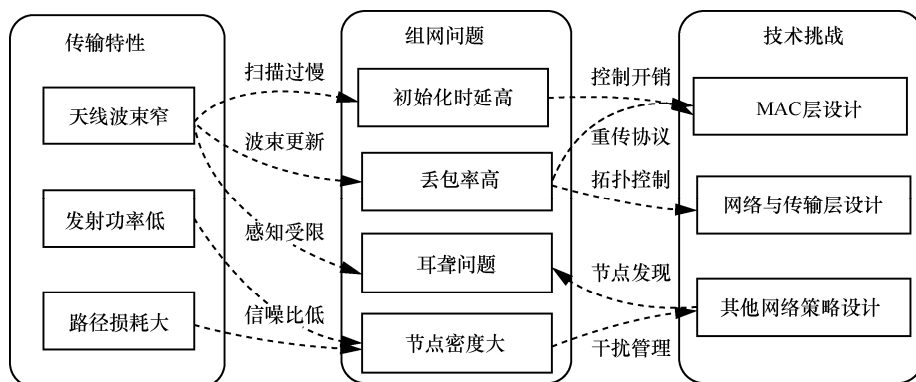


图6 太赫兹传输特性、组网问题、技术挑战关系



毫米波链路和太赫兹链路建立时间进行了仿真对比,证明太赫兹定向链路建立的高时延性(毫米波/太赫兹链路初始化建立时延如图7所示)。该仿真场景中,毫米波链路和太赫兹链路使用相同的3GPP NR帧结构和时间等待模型,所设置的基站每 T_s 发送若干同步信号,使移动节点评估信道质量并确定最佳波束。结果表明,太赫兹链路基站每5 ms发送64个同步信号,链路建立时延仍高达32 s。因此初始化时间长是太赫兹无线组网面临的主要问题之一。

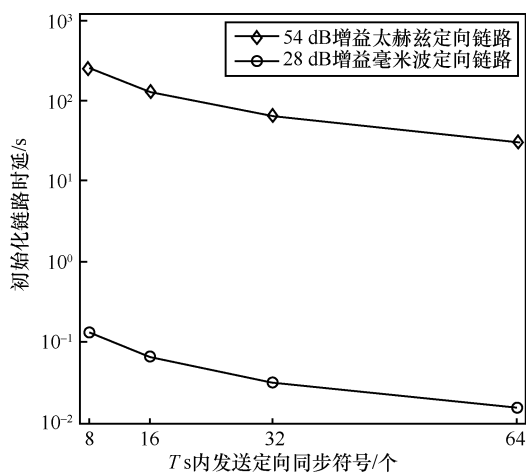


图7 毫米波/太赫兹链路初始化建立时延^[25]

(2) 链路重传效果差、丢包率高

太赫兹缓冲队列长度有限,在处理速率高达几十甚至几百吉比特每秒的速率时会被快速填满,造成不可预测的阻塞,从而产生网络丢包现象;且窄波束和太赫兹基站的频繁更新会破坏发送端和接收端之间的确认流,从而导致数据包传输失败。

(3) 定向耳聋,网络节点移动性感知差

在太赫兹移动网络场景中,节点需具有环境感知能力,包括信息感知和位置感知。一方面,节点需要对传输的信息进行感知与确认。尤其在集中式拓扑场景中,基站或AP需感知信道占用情况以实现资源调配;另一方面,节点需要对其他网络设备位置进行感知,以实现波束对准和数

据传输。因此节点对信道占用情况感知、网络设备位置感知是建立通信链路的前提。然而,传统组网方案无法满足太赫兹组网的感知需求。在传统低频蜂窝网络和WLAN场景中,使用(准)全向天线进行信号广播,且基站发送的同步信号能够被覆盖区域内的用户同时接收。但在太赫兹组网场景下,窄波束的强方向性将会严重影响设备与设备间、设备与基站间的位置感知、信道侦听和数据接收,从而产生耳聋问题。此外,为了获得信号传输的最大增益,网络节点之间需要将收/发波束进行对准,这会增大链路传输时延、限制频谱利用率、损害移动场景下的通信可靠性。

(4) 网络部署密度大、覆盖范围小、能耗大

针对网络覆盖问题,参考文献[25]构造了基于蒙特卡洛仿真的泊松点过程网络随机撒点模型,将太赫兹基站和毫米波基站部署密度与覆盖率的关系进行了对比讨论。不同频段基站密度和覆盖率关系如图8所示,若采用理想的窄波束定向天线(1 024×256MIMO天线,增益54 dB)来增加链路预算和提高网络覆盖,0.43 THz基站需要部署100个/ km^2 的基站才能达到95%的覆盖率,平均小区半径为56 m;而1.5 THz基站需部署600个/ km^2 ,平均小区半径为23 m。相比之下,30 GHz毫米波基站仅需更小增益天线即可实现更高覆盖率。因此在太赫兹无线组网场景下,低覆盖范围导致高密度部署,将带来极高的能耗问题。

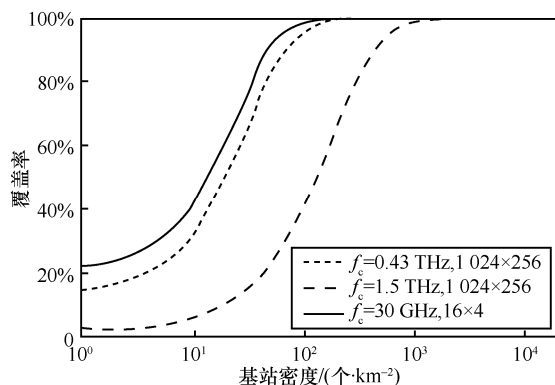


图8 不同频段基站密度和覆盖率关系^[25]

4.2 技术发展趋势与挑战

针对太赫兹组网所面临的问题,亟须从网络协议和策略设计角度展开研究,提升网络吞吐量、覆盖率、时延等性能,从而将太赫兹通信链路与现有网络场景深度结合,实现网络端到端的高效数据传输。本节将从协议设计角度出发,阐述太赫兹无线组网面临的MAC层设计、网络与传输层设计与其他网络策略设计的发展趋势与挑战。

4.2.1 MAC层设计

根据前文的论述,传统的MAC层网络协议无法解决窄波束定向传输而导致的诸多问题,亟须提出面向场景的MAC层协议实现太赫兹无线网络的有效信道访问、控制信息交换、高效链路建立、高效移动性管理和有效数据重传。太赫兹无线组网MAC层协议设计需重点研究如下方面。

(1) 帧结构设计

数据帧长度和持续时间对网络性能至关重要。对于太赫兹无线组网场景,当前3GPP NR帧结构存在链路建立时间过长问题,需要对帧结构长度进行重新设计以实现更好的网络性能。帧结构设计难点在于平衡链路建立时延和数据传输可靠性:短导频能在不影响控制开销的情况下发送更多的同步信号,使多用户的跟踪信号在不同频率上复用,进而降低链路建立的等待时延;但也会降低信道估计性能,使得恢复数据载波的频率响应变得更加困难,从而降低网络容量和有效覆盖。在数据帧持续时间方面,太赫兹相比微波和毫米波网络更短,使得相同持续时间内太赫兹无线网络能够服务更多用户。但帧结构性能的实现必须考虑窄波束快速切换和转向的影响,才具备实际的应用价值。

(2) 波束管理协议设计

基于太赫兹窄波束的特性,在波束控制和波束管理方面,除了对天线结构予以突破外,还需从MAC层角度考虑高效的波束控制方案。在毫

米波领域,已经提出了一些优于穷搜扫描的波束管理替代方案,这些方案对太赫兹窄波束管理有一定的借鉴意义。但太赫兹组网波束管理方案设计仍面临挑战。首先,波束管理协议设计需要考虑链路预算和节点感知间的平衡,更窄的波束能够集中功率、提高链路预算、增大覆盖范围,但会提升波束扫描和节点发现难度。其次,对于多频段融合的复杂组网场景,需要提出多阶段的波束管理方案,在不同的链路需求和组网需求的场景中使用不同宽度的波束来实现用户追踪和信道检测。最后,太赫兹组网可能需要支持多频段的MAC层协议完成不同的网络任务,使用低频的全向天线进行节点感知;使用太赫兹定向波束进行数据传输。因此,亟须能够实现全向天线和定向天线之间灵活切换的波束管理协议。

(3) 多址接入技术

目前对太赫兹组网的多址技术研究主要集中在以CSMA/CA为代表的随机多址方案和以TDMA为代表的固定多址方案上,两种方案在太赫兹组网场景中各有优劣。对于固定多址方案,其优势在于避免冲突能力强、频谱效率高、可实现链路的自适应跟踪。但需考虑太赫兹通信链路高路径损耗,并且控制平面需适应定向天线,固定多址面临保持网络节点之间连通性的挑战。对于随机多址方案,其优势在于系统灵活性高、复杂度低、并发数据之间的干扰冲突小。但数据传输过程中需要收/发端波束对准,如何设计链路建立前的快速节点扫描和高精度同步是随机多址接入的挑战。

(4) 重传协议设计

根据前文讨论,太赫兹无线组网存在链路重传困难、硬件层面难以突破等问题,需要设计更加简洁有效的重传协议。除传统的重传协议外,高效的网络编码技术能够简化重传过程、降低复杂度。网络编码技术不需要对特定数据



包进行重传,而是接收端解码一批数据包的随机组合。该技术为太赫兹链路重传提供了发展方向,但重传问题依然是 MAC 层设计亟须解决的挑战之一。

4.2.2 网络与传输层设计

除 MAC 层协议设计外,网络层与传输层设计是太赫兹无线组网在维护网络结构、实现层级之间的高效数据传输的关键技术。包括如下方面。

(1) 拓扑控制

第 3.1 节已讨论太赫兹无线组网的集中式和分布式拓扑,均需考虑定向链路连通性的保持问题。主要存在两方面挑战:太赫兹网络节点波束更新快,天线方向会周期性打开和关闭。尤其在移动性场景下,网络节点难以保持实时连接;太赫兹无线组网部署密度大,基于节能考虑,网络节点或将采取周期性休眠机制,从而影响网络的最佳路由拓扑。

(2) 控制平面设计

在全面考虑太赫兹路径损耗、基站和能量消耗成本后,完全独立的太赫兹组网在短期内难以实现,需将太赫兹通信链路与现有网络协同融合。这将利用新型太赫兹相控阵列、纳米反射材料等网络元素改善链路预算、增强太赫兹基站的覆盖范围,从而降低基站部署密度,实现网络能耗优化。这些新型网络元素与固定基础设施的集成需要设计专用的控制平面协议,以管理连接不同反射设备的用户间切换并实现高速移动场景下的用户追踪。

(3) 用户平面设计

在实现太赫兹组网过程中,除了太赫兹频段外,还需要融合毫米波和 6 GHz 以下的低频频段。因此网络基站和移动性设备都需要灵活使用最佳性能的频段以达到频谱的最优化利用。太赫兹无线组网场景下的用户平面设计需考虑到用户接口的多连接性这一难点。例如,近距离通信时用户与太赫兹无线接口连接,实现高速率传输;当

传输距离较远时,用户及时切换至毫米波链路、低频段通信链路等方式。

4.2.3 其他网络策略设计

(1) 邻居节点发现方案设计

多址接入均需以节点发现和链路建立为前提,太赫兹组网中窄波束定向天线和用户的高移动性给节点的扫描与定位追踪、链路的建立与保持造成困难。为此,在邻居节点发现方面亟须提出高效的天线扫描策略和高度同步机制。

(2) 干扰管理方案设计

在太赫兹无线组网场景下,大带宽和高度定向降低了干扰冲突。但在节点波束交叉且发生长时间数据传输情况下依然会发生严重的干扰问题。此外,超密集网络节点和用户移动性也加剧了干扰的影响,亟须建立新型干扰模型,能够捕捉太赫兹频带特征,并对干扰源进行跟踪预测。

5 结束语

太赫兹无线组网适用于无线局域网/个域网、信息淋浴、热点蜂窝覆盖、车联网、军事通信和空间通信等场景,可克服当前频谱资源不足难题,满足 6G 高速率和巨容量需求。面向场景的网络拓扑控制、MAC 层协议设计和邻居节点发现研究成果已推动了太赫兹通信的发展。但在硬件设备制约下,太赫兹无线组网仍面临链路时延高、重传效率低、定向耳聋、节点密度过大等挑战,亟须进一步面向场景研究 MAC 层、网络 and 传输层协议栈,发展帧结构、波束管理、多址、重传协议、节点发现策略、干扰管理等技术。这些研究将决定未来太赫兹无线组网的设计与部署,为 6G 网络提供关键技术支持。

参考文献:

- [1] 彭木根,孙耀华,王文博. 智能 6G 无线接入网: 架构、技术和展望[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10.
PENG M G, SUN Y H, WANG W B. Intelligent-concise radio

- access networks in 6G: Architecture, techniques and insight[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(3): 1-10.
- [2] 项弘禹, 张欣然, 朴竹颖, 等. 5G 移动通信系统的接入网络架构[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 10-18.
XIANG H Y, ZHANG X R, PIAO Z Y, et al. Network architecture in the 5G mobile systems[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 10-18.
- [3] LI X, YU J, ZHANG J, et al. A 400G optical wireless integration delivery system[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18812-18819.
- [4] 吴秋宇, 林长星, 陆彬, 等. 21 km, 5 Gbit/s, 0.14 THz 无线通信系统设计与试验[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 1-4.
WU Q Y, LIN C X, LU B, et al. A 21 km 5 Gbit/s real time wireless communication system at 0.14 THz[J]. Power Laser and Particle Beam, 2017, 29(6): 1-4.
- [5] HE Y, CHEN Y, ZHANG L, et al. An overview of terahertz antennas[J]. China Communications, 2020, 17(7): 124-165.
- [6] 张彤, 任奕璟, 闫实, 等. 人工智能驱动的 6G 网络: 智慧内生[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 14-22.
ZHANG T, REN Y J, YAN S, et al. Artificial intelligence driven 6G networks: endogenous intelligence[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 14-22.
- [7] PETROV V, MOLTCHANOV D, KOUCHERYAVY Y. Applicability assessment of terahertz information showers for next-generation wireless networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [8] YOU L, REN Z, CHEN C, et al. An improved high throughput and low delay access protocol for terahertz wireless personal area networks[J]. Journal of Computers, 2019, 28(3): 147-158.
- [9] CACCIAPUOTI A S, RAMANATHAN S, CHOWDHURY K R, et al. Software-defined network controlled switching between millimeter wave and terahertz small cells[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6): 110-115.
- [10] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [11] 中国联合网络通信集团有限公司. 中国联通太赫兹通信技术白皮书[R]. 2020.
China United Network Communications Group Co., Ltd. China Unicom terahertz communication technology white paper[R]. 2020.
- [12] 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室. 面向超视距感知的感知通信一体化智能车联系统[EB]. 2020.
Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications. An intelligent vehicle communication system based on joint sense and communication for beyond-line-of-sight sensing[EB]. 2020.
- [13] SAS. Are you ready for your smart car?[EB]. 2020.
- [14] 焦铭喆, 彭木根, 刘晨熙. 无人机网络的覆盖及切换性能研究[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 74-81.
JIAO M H, PENG M G, LIU C X. Research on coverage and handover performance of unmanned aerial vehicle network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 74-81.
- [15] 刘杨, 彭木根. 6G 内生安全: 体系结构与关键技术[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 11-20.
LIU Y, PENG M G. 6G endogenous security: architecture and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 11-20.
- [16] 王健, 杨闯, 闫宁宁. 面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J]. 电波科学学报, 2021(5): 1-8.
WANG J, YANG C, YAN N N. Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021(5): 1-8.
- [17] LIN J, WEITNAUER M A. Pulse-level beam-switching MAC with energy control in picocell terahertz networks[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4460-4465.
- [18] HAN C, TONG W, YAO X W. MA-ADM: a memory-assisted angular-division-multiplexing MAC protocol in terahertz communication networks[J]. Nano Communication Networks, 2017, 13: 51-59.
- [19] TONG W, HAN C. MRA-MAC: a multi-radio assisted medium access control in terahertz communication networks[C]//Proceedings of GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. [S. l. : s. n.], 2017: 1-6.
- [20] XIA Q, JORNET J M. Cross-layer analysis of optimal relaying strategies for terahertz-band communication networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-8.
- [21] LI Z, GUAN L, LI C, et al. A secure intelligent spectrum control strategy for future terahertz mobile heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6): 116-123.
- [22] 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, 20(1): 2-18.
- [23] PATRA A, SIMIĆ L, PETROVA M. Experimental evaluation of a novel fast beamsteering algorithm for link re-establishment in mm-wave indoor WLAN[C]//Proceedings of 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.



- [24] XIA Q, JORNET J M. Expedited neighbor discovery in directional terahertz communication networks enhanced by antenna side-lobe information[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68 (8): 7804-7814.
- [25] POLESE M, JORNET J M, MELODIA T, et al. Toward end-to-end, full-stack 6G terahertz networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 48-54.

[作者简介]



周天航 (1998-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为太赫兹通信。

杨闯 (1992-), 男, 北京邮电大学在站博士后, 主要研究方向为太赫兹电磁参数测量、太赫兹信道建模、太赫兹通信探测一体化。

刘子乐 (1996-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为太赫兹通信探测一体化。

彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院执行院长、教授, 主要研究方向为 6G 无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。

于丽 (1963-), 女, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为纳米光学、表面等离子激元、等离激元纳米波导、表面等离子激元与量子体系的强耦合。