

6G关键技术（太赫兹通信/智能超表面）在车联网中的组网架构与应用前景

石颖博¹ 张 健²

1. 中国移动通信集团设计院有限公司陕西分公司 陕西 西安 710075

2. 浙江友华工程咨询有限公司 浙江 杭州 310012

摘要：本文聚焦于6G关键技术中的太赫兹通信与智能超表面在车联网领域的应用。首先阐述了车联网的发展现状与面临的挑战，强调6G技术对车联网升级的重要性。接着详细介绍了太赫兹通信和智能超表面的基本原理与特性，在此基础上构建了基于这两种技术的车联网组网架构，并分析了其关键组成部分与工作原理。最后探讨了该组网架构在车联网中的应用前景，包括提升通信性能、增强交通安全、实现智能交通管理等方面，同时也对面临的挑战和未来发展方向进行了展望。

关键词：6G关键技术；太赫兹通信；智能超表面；车联网；组网架构；应用前景

1 引言

近年来，随着5G技术的逐步商用，车联网取得了一定的发展成果，如实现了车辆的高精度定位、实时交通信息的获取和部分自动驾驶功能等。然而，现有的车联网技术在通信速率、时延、可靠性等方面仍存在不足，难以满足未来智能交通系统对海量数据传输和超低时延控制的严格要求。6G作为下一代通信技术，将具备更高的通信速率、更低的时延、更大的连接密度和更智能的网络架构等特性。太赫兹通信和智能超表面作为6G的关键技术，为车联网的发展带来了新的机遇。因此，研究6G关键技术车联网中的组网架构与应用前景具有重要的现实意义。

2 6G 关键技术概述

2.1 太赫兹通信

2.1.1 基本原理

太赫兹波是指频率在0.1-10THz范围内的电磁波，其波长介于微波和红外线之间。太赫兹通信利用太赫兹波作为信息载体，通过调制和解调技术将信息加载到太赫兹波上进行传输。由于太赫兹波具有极高的频率，因此可以提供比现有通信技术更宽的带宽，实现超高速的数据传输。

2.1.2 特性

(1) 高速率：太赫兹通信的带宽可达数十GHz甚至上百GHz，理论上传输速率可达Tb/s级别，能够满足车联网中大量数据的实时传输需求，如高清视频监控、虚拟现实交互等。(2) 短距离传输：太赫兹波在空气中传播时容易受到水汽等分子的吸收，导致信号衰减较大，因此其传输距离相对较短，一般在几十米到几百米之间^[1]。但在车联网的局部场景中，如车辆之间的近距离通信和

车辆与路边基础设施的短距离交互，太赫兹通信具有很大的优势。(3) 高方向性：太赫兹波的波长较短，具有较高的方向性，能够实现精确的波束赋形，减少信号干扰，提高通信的可靠性和安全性。

2.2 智能超表面

2.2.1 基本原理

智能超表面是一种由大量亚波长单元组成的人工电磁材料表面，这些单元可以通过外部控制信号动态调整其电磁参数，如反射相位、透射相位等。通过对智能超表面单元的合理设计和控制，可以实现对入射电磁波的波前调控，包括波束聚焦、波束扫描、异常反射等功能。

2.2.2 特性

(1) 动态调控能力：智能超表面能够根据实际通信环境和需求，实时调整其电磁特性，实现对无线信号的灵活控制。例如，在车联网中，可以根据车辆的位置和移动速度，动态调整信号的反射方向，提高信号覆盖范围和通信质量。(2) 低成本和低功耗：智能超表面主要由无源元件组成，不需要复杂的射频电路和功率放大器，因此具有成本低、功耗小的优点。这使得智能超表面在大规模部署和应用方面具有很大的潜力。(3) 增强信号覆盖：通过合理设计智能超表面的结构和控制策略，可以将原本无法到达的信号反射到目标区域，从而增强信号覆盖范围，解决车联网中的信号盲区问题。

3 基于太赫兹通信和智能超表面的车联网组网架构

3.1 整体架构设计

基于太赫兹通信和智能超表面的车联网组网架构由车辆终端、路边基础设施、智能超表面节点和核心

网络四部分协同构建。车辆终端作为移动节点，搭载太赫兹通信模块与智能超表面控制单元，实现车与车（V2V）、车与基础设施（V2I）的高效通信；路边基础设施（如基站、路侧单元RSU）作为中继节点，负责数据汇聚与初步处理，并连接核心网络；智能超表面节点（RIS）作为环境调控层，通过动态调整电磁特性优化无线信道；核心网络则承担全局数据管理、智能决策与资源调度功能。四者通过太赫兹频段（0.1—10THz）的高速无线链路与有线光纤网络互联，形成“终端-边缘-核心”三级架构，支持低时延、高可靠的车联网服务。

3.2 关键组成部分与工作原理

3.2.1 车辆终端：移动智能通信节点

车辆终端集成太赫兹天线阵列、收发模块及智能超表面控制单元。太赫兹通信模块利用其大带宽特性（可达数百GHz），支持高清图实时更新、自动驾驶传感器数据共享等高吞吐量场景（速率可达100Gbps以上）。智能超表面控制单元通过嵌入式传感器（如雷达、摄像头）感知周围环境，结合通信质量反馈（如信噪比、误码率），动态调整车载智能超表面的相位、幅度等电磁参数。例如，当车辆进入隧道或被大型车辆遮挡时，控制单元可编程调整超表面单元，将信号反射至目标方向，形成可重构波束，克服非视距（NLOS）传播损耗，保障通信连续性^[2]。此外，车辆终端支持多接入边缘计算（MEC），可本地处理部分紧急数据（如碰撞预警），降低核心网负载。

3.2.2 路边基础设施：边缘智能处理枢纽

路边基础设施包含基站与路侧单元（RSU）。基站采用太赫兹大规模MIMO技术，通过波束赋形实现与车辆终端的定向高容量连接，覆盖范围约200—500米。RSU部署于路口、路段关键点，集成毫米波/太赫兹双模通信模块，兼容现有车联网标准（如C-V2X）。其核心功能包括：（1）数据采集：通过V2I链路收集车辆位置、速度、加速度等状态信息，以及道路湿度、能见度等环境数据；（2）本地处理：运行轻量级AI模型（如TinyML），实时分析交通流，生成局部路况预警（如拥堵、事故）；（3）协同控制：与核心网络交互，接收全局调度指令，并通过太赫兹广播向覆盖区内车辆发送协同式自适应巡航（CACC）控制信号。此外，部分RSU集成智能超表面，通过反射增强信号覆盖盲区（如建筑物阴影区），提升边缘区域通信质量。

3.2.3 智能超表面节点：动态信道调控层

智能超表面节点由大量亚波长单元（如可调谐液晶、石墨烯）组成二维阵列，通过软件定义辐射模式，

实现对入射太赫兹波的反射、透射或吸收控制。其部署策略包括：（1）固定部署：安装于十字路口、高架桥等信号复杂区域，通过预编程模式优化多车辆并发通信。例如，在十字路口，RIS可将来自四个方向的车辆信号分别反射至对应车道，减少交叉干扰；（2）移动部署：搭载于无人机或应急车辆，快速构建临时通信链路（如灾害救援场景）。节点通过光纤或太赫兹回程链路连接核心网络，接收控制指令并反馈信道状态信息（CSI）。结合数字孪生技术，核心网络可预测车辆轨迹，提前配置RIS参数，实现“环境-通信”协同优化。

3.2.4 核心网络：全局智能决策中心

核心网络采用软件定义网络（SDN）与网络功能虚拟化（NFV）架构，包含以下关键模块：（1）数据湖：存储车辆历史轨迹、交通事件、环境感知等多源异构数据，支持TB级/秒的写入与查询；（2）AI引擎：运行深度强化学习（DRL）模型，分析车流时空分布规律，预测拥堵热点，并生成动态交通调度策略（如可变车道、绿波带优化）；（3）资源管理器：根据车辆服务需求（如自动驾驶、娱乐）分配太赫兹频谱与RIS资源，采用网络切片技术保障关键业务（如紧急制动）的QoS；（4）控制接口：通过标准化API（如OpenFlow）下发RIS配置指令，并监控节点状态，实现全网资源动态调整。例如，在高峰时段，核心网络可调度路口RIS聚焦信号至高密度车流方向，同时压缩对向空闲车道资源，提升整体吞吐量。

4 基于该组网架构的车联网应用前景

4.1 提升通信性能

4.1.1 高速数据传输

太赫兹通信的高速率特性使得车联网能够实现高清视频、三维地图等大数据量的实时传输。例如，在自动驾驶场景中，车辆可以通过太赫兹通信实时获取周围环境的高清视频信息，结合智能超表面对信号的优化，提高环境感知的准确性和实时性，为自动驾驶决策提供更可靠的依据。

4.1.2 低时延通信

6G关键技术的应用可以显著降低车联网的通信时延。太赫兹通信的短距离传输和高方向性特点减少了信号传播的路径和干扰，智能超表面的动态调控能力可以快速调整信号传输方向，避免信号绕路和拥塞，从而实现超低时延的通信^[3]。这对于车辆的实时控制和交通安全至关重要，例如在紧急制动、碰撞预警等场景中，低时延通信可以确保车辆能够及时接收到指令并做出反应。

4.2 增强交通安全

4.2.1 实时交通信息共享

基于该组网架构的车联网可以实现车辆之间、车辆与基础设施之间的实时交通信息共享。车辆可以通过太赫兹通信将自身的位置、速度、行驶方向等信息快速传输给周围车辆和路边基础设施,同时接收其他车辆和基础设施发送的交通信息。智能超表面可以增强信号覆盖范围,确保信息在复杂环境下的可靠传输。通过实时交通信息共享,驾驶员可以提前了解前方路况,避免交通事故的发生。

4.2.2 协同式安全预警

车联网中的车辆和基础设施可以协同工作,实现协同式安全预警。当车辆检测到潜在的危險情况,如前方车辆突然制动、行人闯入道路等,可以通过太赫兹通信及时向周围车辆和路边基础设施发送预警信息。智能超表面可以对预警信息进行优化传输,确保信息能够快速、准确地到达目标车辆。其他车辆接收到预警信息后,可以及时采取措施,如减速、避让等,从而有效避免交通事故的发生。

4.3 实现智能交通管理

4.3.1 智能交通流量调控

核心网络可以通过收集和分析车辆信息和交通信息,实现对交通流量的智能调控。例如,根据实时交通流量情况,智能超表面节点可以动态调整信号灯的时长,优化交通信号控制,提高道路的通行效率。同时,核心网络还可以通过太赫兹通信向车辆发送交通诱导信息,引导车辆选择最优的行驶路线,缓解交通拥堵。

4.3.2 自动驾驶协同控制

在自动驾驶场景中,基于该组网架构的车联网可以实现车辆之间的协同控制。车辆可以通过太赫兹通信实时共享行驶状态和决策信息,智能超表面可以优化信号传输,确保协同控制指令的准确传达^[4]。核心网络可以对车辆进行集中调度和管理,实现自动驾驶车辆的高效编队行驶,提高道路运输效率和安全性。

5 面临的挑战与未来发展方向

5.1 面临的挑战

5.1.1 技术成熟度

太赫兹通信和智能超表面作为新兴技术,目前仍处于研究和开发阶段,技术成熟度有待提高。例如,太赫兹通信设备的成本较高、体积较大,难以实现大规模商用;智能超表面的控制算法和优化策略还需要进一步研究和完善,以提高其性能和可靠性。

5.1.2 标准制定

车联网涉及多个领域和行业,需要制定统一的标准和规范来确保不同设备和系统之间的兼容性和互操作

性。目前,6G关键技术车联网中的应用标准尚未完善,这给技术的推广和应用带来了一定的困难。

5.1.3 安全与隐私问题

车联网中大量车辆信息和交通信息的传输和共享,使得安全与隐私问题成为亟待解决的问题。如何保障通信的安全性,防止信息泄露和恶意攻击,是车联网发展面临的重要挑战。

5.2 未来发展方向

5.2.1 技术创新与突破

加大对太赫兹通信和智能超表面技术的研发投入,突破关键技术瓶颈,提高技术成熟度。例如,开发低成本、小型化的太赫兹通信设备,优化智能超表面的控制算法和结构设计,提高其性能和可靠性。

5.2.2 标准制定与完善

加强行业合作与交流,共同制定6G关键技术车联网中的应用标准和规范。建立统一的测试认证体系,确保不同设备和系统之间的兼容性和互操作性,为技术的推广和应用奠定基础。

5.2.3 安全与隐私保护

采用先进的加密技术和安全机制,保障车联网通信的安全性。同时,加强数据管理和隐私保护,制定严格的数据使用规则和隐私政策,确保车辆信息和交通信息的安全和隐私。

结语

本文研究了6G关键技术中的太赫兹通信和智能超表面在车联网中的组网架构与应用前景。通过构建基于这两种技术车联网组网架构,分析了其关键组成部分与工作原理,并探讨了该架构在提升通信性能、增强交通安全和实现智能交通管理等方面的应用前景。虽然目前6G关键技术车联网中的应用还面临一些挑战,但随着技术的不断创新和突破、标准的制定与完善以及安全与隐私保护措施加强,基于太赫兹通信和智能超表面的车联网组网架构有望在未来实现大规模商用,为智能交通系统的发展带来革命性的变化。

参考文献

- [1]林粤伟,王溢,张奇勋,等.面向6G的通信感知一体化车联网研究综述[J].信号处理,2023,39(06):963-974.
- [2]陈源彬.智能超表面赋能6G车联网关键技术研究[D].北京邮电大学,2024.
- [3]王洋,杨闯,彭木根.车联网场景下的视觉辅助太赫兹多用户波束跟踪[J].移动通信,2023,47(09):89-95.
- [4]马忠贵,李卓,梁彦鹏.自动驾驶车联网中通感算融合研究综述与展望[J].工程科学学报,2023,45(01):137-149.