

5G 车联网展望

王良民¹, 刘晓龙¹, 李春晓², 杨晴², 杨卫东³

(1. 江苏大学计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 扬州大学信息工程学院, 江苏 扬州 225009;

3. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 分析了当前结构下车联网的功能特点, 结合新兴的 5G 通信技术, 提出了可多网接入与融合的 5G 车联网体系结构。该结构不同于基于 IEEE 802.11p 的车联网 VANET 结构, 而是采用 D2D 技术实现车联网灵活的终端通信。对比了 5G 车联网和基于 IEEE 802.11p 的 VANET 结构中关键技术参数, 并分析了 5G 车联网低时延、频谱和能源的高效利用等特点以及面临的干扰管理和安全方面的挑战。最后, 展望了 5G 车联网在商业和特定环境下的应用与发展趋势。

关键词: 5G; 车联网; D2D; 低时延; 多网融合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00064

Overview of Internet of vehicles for 5G

WANG Liang-min¹, LIU Xiao-long¹, LI Chun-xiao², YANG Jing², YANG Wei-dong³

(1. School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

3. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The functions and characteristics of current IOV(Internet of vehicles) Internet of vehicles were analyzed. Moreover, combined with 5G communication technology, the architecture of IOV for 5G was proposed to implement access and integration of multi-network. Different from the IEEE 802.11p based architecture of VANET, device-to-device (D2D) technology was introduced to achieve flexible terminals communication of IOV. In comparing with VANET based on IEEE 802.11p in terms of key technology parameters, the IOV for 5G possesses the better characteristics in terms of low latency and efficient spectrum utilization, and also need to face new interference management and security challenges. At the end, the application and development trends of IOV for 5G in the business and the specific environment were prospected.

Key words: 5G, Internet of vehicles, D2D, low latency, integration of multi-network

1 引言

近年来, 因汽车数量持续增长而引起的交通安全、出行效率、环境保护等问题日益突出, 车

联网相关领域的研究和发展受到了广泛关注。车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础, 融合了传感器、RFID (radio frequency identification)、数据挖掘、自动控制等相关技术, 按

收稿日期: 2016-05-14; 修回日期: 2016-06-04。通信作者: 王良民, wanglm@ujs.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61472001, No.U1405255); 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No.BE2015136)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61472001, No.U1405255), The Key Research and Development Plan project of Jiangsu Province (No.BE2015136)

照约定的通信协议和标准,在车 X(X:车、路、行人、互联网)交互过程中,实现车辆与公众网络的动态移动通信,是物联网技术在交通系统领域的典型应用。

在车联网中,车辆作为移动通信设备和用户的载体,以拓扑节点的形式组织移动网络拓扑。由于车辆自身的移动性,车载通信具有移动区域受限、网络拓扑变化快、网络频繁接入和中断、节点覆盖范围大、通信环境复杂等特点^[1]。根据车联网的上述特征,当前车联网的实施存在以下多方面挑战和困难。

1) 在体系结构方面,由于移动互联网通信技术的快速发展,为满足用户的多功能体验,车联网的体系结构变得复杂。在车载移动互联网中,路侧单元(RSU, road side unit)作为车辆自组网(VANET, vehicular ad hoc network)无线接入点,将车辆以及道路等信息上传至互联网并发布相关交通信息,这种车与基础设施(V2I, vehicle to infrastructure)的协作通信模型需要大量的 RSU 支撑,增加了建设的成本和能源消耗^[2]。

2) 在通信方面,车联网中存在多种类型的通信网络,这些网络使用不同的标准和协议,数据处理和网络的融合不完善,影响车联网系统运行效率。虽然 IEEE 802.11p 标准的车辆自组网通信在高速运行环境下传输距离远、分组丢失率低、可靠性高,但在极其复杂的非视距(NLOS, non-line of sight)环境下通信质量会受到不同程度的干扰^[2]。另外,由于车辆的高速移动,需要快速可靠的网络接入与信息交互,时延受限成为当前车联网面临的重要问题。

3) 在安全方面,车联网中的用户信息都将连接在该网络上,随时随地被感知,很容易被干扰和窃取,严重影响了车联网体系的安全。当前车联网在每一层都存在不同程度的威胁:在感知层,车辆单元(OBU, on-board unit)和路侧单元 RSU 节点的物理安全、感知信息的无线传输;在网络层,数据破坏、数据泄露、虚假信息等安全与隐私问题^[3];在应用层,也存在身份假冒、越权操作等由于技术方面的不足或因管理不当而带来的隐形危害。

近年来,车联网在体系结构、通信以及安全方面存在的问题成为当前学术界和工业界的研究

热点,而随着第 5 代移动通信(5G)的快速发展,5G 移动通信网络将融合大规模天线阵列、超密集组网、终端直通、认知无线电(CR, cognitive radio)等先进技术^[4],以更加灵活的体系结构解决多样化应用场景中差异化性能指标带来的挑战。其中,5G 通信技术在低时延、高移动性车联网场景的应用,解决了当前车联网面临的多方面问题和挑战,使 OBU 在高速移动下获得更好的性能。而且,5G 通信技术让车联网不用单独建设基站和服务基础设施,而是随着 5G 通信技术的应用普及而普及,为车联网的发展带来历史性的机遇。

2 5G 车联网的体系结构

未来 5G 通信技术在车联网场景的应用使车联网拥有更加灵活的体系结构和新型的系统元素(5G 车载单元 OBU、5G 基站、5G 移动终端、5G 云服务器等)。除了在车内网、车际网、车载移动互联网实现 V2X(X:车、路、行人及互联网等)信息交互以外,5G 车联网还将实现 OBU、基站、移动终端、云服务器的互联互通,分别给予它们特殊的功能和通信方式。5G 车联网体系结构的特点主要体现在 OBU 多网接入与融合、OBU 多渠道互联网接入、多身份 5G 基站。

2.1 OBU 多网接入与融合

目前,在车联网中,多种网络共存,包括基于 IEEE 802.11a/b/g/n/p 标准协议的 WLAN、2G/3G 蜂窝通信、LTE 以及卫星通信等网络,这些网络在车联网通信中使用不同的标准和协议,数据处理和信息交互不完善。而 5G 车联网将融合多种网络,实现无缝的信息交互和通信切换。

5G 移动通信网络是一个包括宏蜂窝层和设备层的双层网络^[5],其中,宏蜂窝层与传统蜂窝网络相似,涉及基站和终端设备之间的直接通信。在设备层通信中,设备到设备(D2D, device-to-device)通信是 5G 移动通信技术的重要组成部分,是一种终端与终端之间不借助任何网络基础设施直接进行信息交互的通信方式^[6]。根据基站对资源分配和对起始、目的、中继终端节点的控制情况,D2D 终端通信方式可分成 4 类^[5]。

1) 基站控制链路的终端转发。终端设备可以在信号覆盖较差的环境下,通过邻近终端设备的信

息转发与基站通信,其中,通信的链路建立由基站和中继设备控制,在这种通信方式下,终端设备可实现较高的服务质量(QoS, quality of service)。

2) 基站控制链路的终端直接通信。终端之间的信息交互与通信没有基站的协助,但需要基站控制链路的建立。

3) 终端控制链路的终端转发。基站不参与通信链路的建立和信息交互,源终端与目的终端通过中继设备协调控制彼此之间的通信。

4) 终端控制链路的终端直接通信。终端之间的通信没有基站和终端设备的协助,可自行控制链路的建立,这种方式有利于减轻设备之间的干扰。

图1展示了5G移动通信网的D2D通信方式在车联网的应用。未来5G车联网D2D通信技术将为车联网提供新的通信模式。其中,在车载移动互联网, OBU可直接通过5G基站或中继(包括邻近的OBU、用户移动终端)快速接入互联网,实现车与云服务器器的信息交互;在车内网,为充分实现用户与车辆的人机交互,以OBU为媒介,与用户5G移动终端之间在没有基站或其他终端设备协助情况下,通过自行控制链路,进行短距离的车辆数据传输;在基于D2D的通信网络中,5G车载单元可在网络通信边缘或信号拥塞地带基于单跳或多跳的D2D建立ad hoc网络,实施

车辆自组网通信^[5]。

通过以上对5G车联网通信方式的分析,如图2所示,5G车联网将改变基于IEEE 802.11p标准的车联网通信方式,实施多实体之间(OBU之间以及OBU与车主移动终端、行人、5G基站、互联网之间)的信息交互,实现OBU的多网接入^[2]以及车内网、车际网、车载移动互联网的“三网融合”。

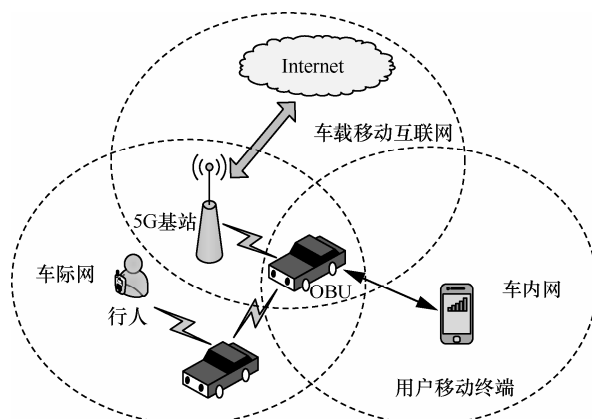


图2 5G车联网“三网融合”结构

2.2 多身份5G基站

传统的基站作为终端通信的中继,在数据转发和链路控制等方面起着重要作用;而5G基站的大量部署,将实现超密集网络,从而给予用

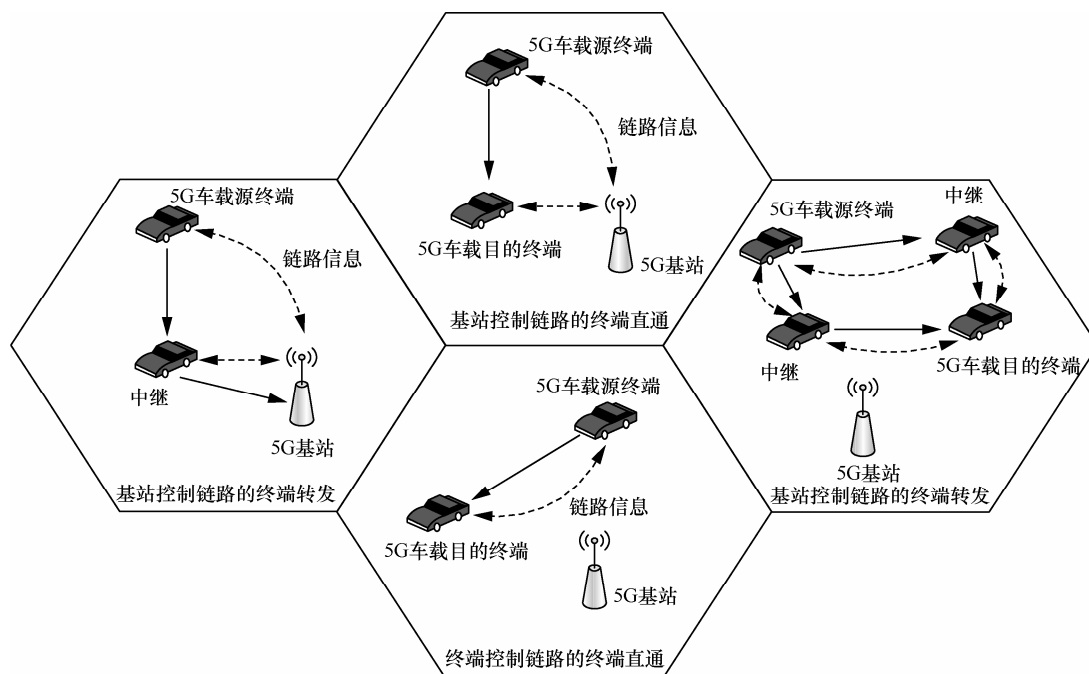


图1 5G车联网基于D2D的通信方式

户精确定位、协助终端通信等功能。在基于 5G 毫米波的通信网络中, D2D 技术涉及终端与基站 (D2B)、基站与基站 (B2B) 之间的直接通信^[7]。其中, D2B 与 B2B 以自组织方式通信将是一个重要的突破, 这决定了 5G 基站将以不同的角色发挥至关重要的作用。在车联网的应用场景, 5G 基站将拥有以下功能。

1) 协作中继。5G 基站具备传统基站的中继转发功能, 作为无线接入点, 协助车与互联网通信。

2) 担当 RSU。在高速运行的环境下, 车辆自组网通信中的 5G 基站将取代 RSU, 与 OBU 实时通信, 通过广播的方式向车辆自组网中的车辆发布交通信息, 并协助车与车通信以及多个车辆自组网通信。这不仅节约了车联网体系的构建成本, 而且解决了 V2I 协作通信系统^[8]融合面临的多方面问题^[9]。

3) 精确定位。GPS 作为当前 OBU 的定位系统是非常脆弱的, 容易受到欺骗、阻塞等多种类型的攻击。并且, GPS 的信号容易受到天气影响, 导致无法实施精确定位^[2]。未来 5G 基站的大量部署使用更高的频率和信号带宽, 实施密集网络以及大规模的天线阵列, 使 OBU 在 NLOS 复杂环境下减少定位误差。其次, D2D 通信充分利用高密度的终端设备连接的优势, 从以下两方面提高定位性能^[10]。一方面, 大量的 D2D 链路可以为确定车辆之间的伪距提供信号观测, 如式(3)和式(5)所示, D2D 通信不仅使 OBU 可以接收来自邻近车辆和移动终端的信息, 其同步和信道估计单元等信号处理的实体还可被复用于信号传输的延时估计。在车联网中, D2D 通信模式提供了一个网状网络, N 个 OBU 构成的最大链路数为 $N(N-1)$ 。另一方面, OBU 的 D2D 通信链路为定位直接交换所需数据, 可进一步加快局部决策, 改进位置估计过程的收敛时间。图 3 为基于 D2D 的协作定位系统, 车载终端 OBU1 从基站 2 接收的信号为

$$Y_{B2,V1}(t) = \eta_{B2,V1} S_{B2} \left(t - \frac{1}{c_0} (c_0 T_{V1} + L_{B2,V1}) \right) + N_{B2,V1}(t) \quad (1)$$

其中, 车载终端 OBU1 与基站 2 之间的距离 $L_{B2,V1}$ 为

$$L_{B2,V1} = \sqrt{(X_{V1} - X_{B2})^2 + (Y_{V1} - Y_{B2})^2} \quad (2)$$

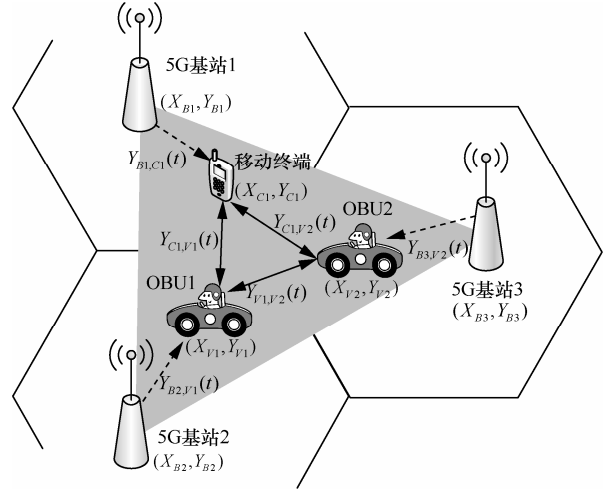


图3 5G车联网协作定位系统

$\eta_{B2,V1}$ 是用来描述大尺度衰落特性的标量因子, S_{B2} 为传输的基带信号, c_0 描述信号传输的延迟, T_{V1} 是车载终端 OBU1 的时基与该协同网络的时间偏移, $N_{B2,V1}(t)$ 为加性高斯白噪声。车载终端 OBU1 与基站 2 之间的伪距为

$$d_{B2,V1} = c_0 T_{V1} + \sqrt{(X_{V1} - X_{B2})^2 + (Y_{V1} - Y_{B2})^2} \quad (3)$$

当从车载终端 OBU1 发送基带信号 $S_{V1}(t + T_{V1})$ 时, 在 OBU2 可接收到的信号为

$$Y_{V1,V2}(t) = \eta_{V1,V2} S_{V1} \left(t - \frac{c_0 (T_{V2} - T_{V1}) + L_{V1,V2}}{c_0} \right) + N_{V1,V2}(t) \quad (4)$$

$L_{V1,V2}$ 是车载终端 OBU1 与车载终端 OBU2 之间的距离, 即 $L_{V1,V2} = \sqrt{(X_{V2} - X_{V1})^2 + (Y_{V2} - Y_{V1})^2}$, 则基于 D2D 的 V2V 链路中车载终端 OBU1 与 OBU2 之间的伪距为

$$d_{V1,V2} = c_0 (T_{V2} - T_{V1}) + L_{V1,V2} \quad (5)$$

其中, T_{V2} 是车载终端 OBU2 的时基与该协同网络的时间偏移。

2.3 多渠道互联网接入

在将来 5G 移动网络通信中, 文献[5]指出 5G 终端通过自行控制通信链路建立, 定期广播身份信息, 其他邻近的终端及时发现并评估多个信道状态信息 (CSI, channel state information), 自适应地选择当前最优的信道^[11], 决定建立一个 5G 终端之间的直接通信或选择合适的中继转发消息, 这种通信方式使 5G 终端以最优的方式实现信息交互, 同时也提高频谱和能源的利用率。

根据 5G 终端高效、多样化的通信方式, OBU 可通过多种渠道接入互联网。如图 4 所示, OBU 除了可按照当前车联网的 V2I 协作通信方式外, 还可通过邻近的 5G 基站、5G 车载单元 OBU 和 5G 移动终端等多种渠道自适应地选择信道质量较好的方式接入互联网。

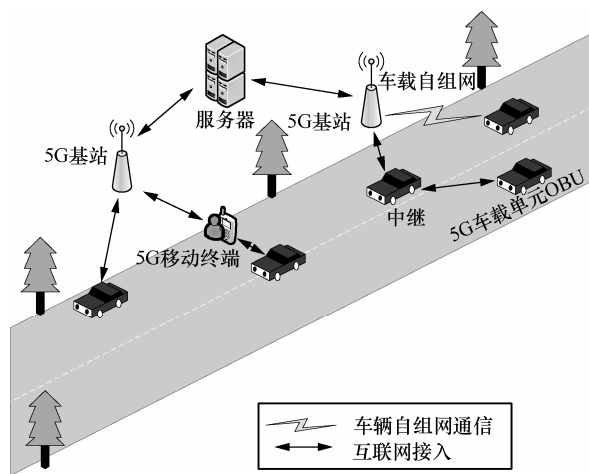


图4 5G 车联网 OBU 多渠道互联网接入结构

3 5G 车联网特征

5G 移动通信融合 CR、毫米波、大规模天线阵列、超密集组网、全双工通信 (FD, wireless full-duplex) 等关键技术^[4], 显著提高了通信系统的性能。在车联网应用场景中, 相比 IEEE 802.11p 标准的通信, 5G 车联网的特点主要体现在低时延与高可靠性、频谱和能源高效利用、更加优越的通信质量。

3.1 低时延与高可靠性

作为车联网信息的发送端、接收端和中继节点, 消息传递过程必须保证私密性、安全性和高数据传输率, 通信具有严格的时延限制^[12]。目前, 研究的车联网通信数据的密集使用以及频繁交换, 对实时性要求非常高, 然而, 受无线通信技术的限制 (如带宽、速度和域名等), 通信时延达不到毫秒级, 不能支持安全互联需求。

5G 高/超高密集度组网、低的设备能量消耗大幅地减小信令开销, 解决了带宽和时延相关问题, 且 5G 的时延达到了毫秒级, 满足了低延时和高可靠性需求, 成为车联网发展的最大突破口。在 5G 车联网通信中, 为更好地研究与应用低时延和高可靠性的链路特征, 文献^[13]分析了适应于以

300 km/h 速度移动车辆通信的 5G 自适应天线, 提高了 OBU 与基站的通信质量, 降低了在信道估计与数据传输之间产生的时延。文献^[14]提出利用网络功能虚拟化 (NFV, network function virtualization) 和软件定义网络 (SDN, software defined network) 技术提高 5G 网络体系结构的灵活性, 并提出实现低时延服务的解决方案, 主要包括服务预约和配置、减少 IP 地址解析的时延、连续服务时延的优化。其中, 5G 网络服务的优化不仅要支持当前的应用服务, 而且要适应高速增长的信息量并满足将来多样性的服务需求^[15], 尤其是对于时延高度敏感的通信, 如车联网 V2X 通信场景, 严格要求低时延和高可靠性, 是 5G 网络体系结构应用的显著特点。

根据表 1 设置的主要参数实施基于 D2D 模式的 V2V 通信时延仿真, 得到了如图 5 所示的结果。随着车辆数目的增加, 端到端的通信时延基本保持平稳状态, 而 5G 车联网基于 D2D 技术将实现车与车、车与基站以及 5G 移动终端通信, 其空口时延在 1 ms 左右, 端到端时延控制在毫秒级^[14], 延时性能比 IEEE 802.11p 标准的通信方式优越, 有效地保障了通信的可靠性^[2]。

表 1 基于 D2D 模式的 V2V 通信时延仿真参数

参数	数值
车辆运行速度	55 km/h
噪声系数	4 dB
系统带宽	5 MHz
载波频率	2.6 GHz
噪声功率密度	-180 dBm/Hz
基站传输功率	45 dBm
OBU 传输功率	4 dBm
V2V 通信车距	120 m

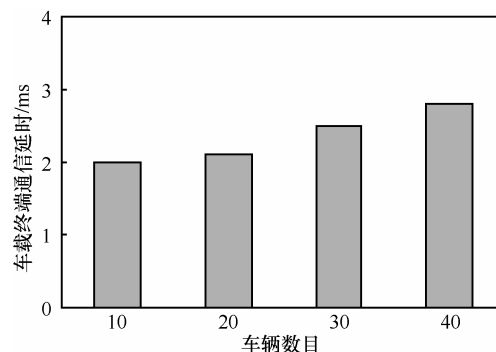


图5 基于 D2D 模式的 V2V 通信时延分析

3.2 频谱和能源高效利用

频谱和能源的高效利用是5G用户体验的一个重要特征。5G通信技术在车联网的应用,将解决当前车联网资源受限等问题。5G车联网的频谱和能源高效利用主要体现在以下几个方面。

1) D2D通信。在5G通信中,D2D通信方式通过复用蜂窝资源实现终端直接通信。5G车载单元将基于D2D技术实现与邻近的车载单元、5G基站、5G移动终端的车联网自组网通信和多渠道互联网接入。通过这种方式提高车联网通信的频谱利用率^[16],与基于IEEE 802.11p标准的车联网V2X通信方式相比,减少了成本的支出,节约了能源。

2) 全双工通信。5G移动终端设备使用全双工通信方式,允许不同的终端之间、终端与5G基站之间在相同频段的信道可同时发送并接收信息,使空口频谱效率提高一倍,从而提高了频谱使用效率^[17]。

3) 认知无线电。认知无线电技术是5G通信网络重要的技术之一^[18]。在车联网应用场景中,车载终端通过对无线通信环境的感知,获得当前频谱空洞信息,快速接入空闲频谱,与其他终端高效通信。这种动态频谱接入的应用满足了更多车载用户的频谱需求,提高频谱资源的利用率。其次,车载终端利用认知无线电技术可以与其他授权用户共享频谱资源,从而解决无线频谱资源短缺的问题。

除了以上提到的频谱和能源高效应用外,最近的相关研究表明,在不影响通信性能的情况下,5G基站的大规模天线阵列的部署有潜在的节约能源作用^[19-21]。其次,在车辆自组网中,5G车载单元及时发现邻近的终端设备,且与之通信的能力也会减少OBU间通信的能源消耗。

3.3 更加优越的通信质量

5G通信网络被期望拥有更高的网络容量并且可为每个用户提供每秒千兆级的数据速率,以满足QoS的要求。文献[7]提出频段为30~300 GHz的毫米波通信系统可为5G终端之间以及终端与基站之间以更好的通信质量进行信息交互。其中,毫米波拥有极大的带宽,可提供非常高的数据传输速率,并减少环境的各种干扰,降低终端之间连接中断的概率。

表2是5G车联网与基于IEEE 802.11p标准的车联网在VANET关键技术参数方面的比较^[2],结果表明,5G车联网拥有比当前车联网更加优越的无线链路特征。

1) 通信距离。5G车联网V2V通信的最大距离大约为1 000 m,从而可以解决IEEE 802.11p车辆自组网通信中短暂、不连续的连接问题,尤其是在通信过程中遇到大型物体遮挡的NLOS环境下。

2) 传输速率。5G车联网为V2X通信提供高速的下行和上行链路数据速率(最大传输速率为1 Gbit/s)。从而使车与车、车与移动终端之间实现高质量的音视频通信。

3) 高速移动性。与IEEE 802.11p标准通信相比,5G车联网支持速度更快的车辆通信,其中,支持车辆最大的行驶速度约为350 km/h。

4 挑战

5G车联网将先进的5G通信技术应用在车联网领域,改善了传统车联网的通信方式、通信质量,优化了车联网的体系结构,为车联网发展带来了重大变革,但5G车联网也面临着重大的挑战,主要体现在干扰管理、通信安全和驾驶安全3个方面^[5]。

表2 5G车联网与当前车联网在VANET关键技术参数的比较

无线链路特征	VANET 通信类型	
	当前车联网	5G车联网
通信方式	IEEE 802.11p / IEEE 1609 标准通信	基于 D2D 的终端直接通信
最大传输距离	800 m	1 000 m
最大移动速度	60 km/h	350 km/h
最大数据速度	27 Mbit/s	1 Gbit/s
频段	5.86~5.92 GHz	授权频段
时延	大于 10 ms	约 1 ms

4.1 干扰管理

对于有限资源的高效利用, 资源复用和密集化被应用于 5G 蜂窝网络, 尽管可以增加信号容量和吞吐量并额外地提高宏蜂窝与局域网络的资源共享, 但这些优点出现的同时却产生了同信道干扰问题。因此, 作为二元体系^[5]的 5G 移动通信网络, 干扰管理是个重要问题。

基于 D2D 技术的基站控制通信链路的终端直接通信以及终端作为中继的通信方式, 基站可以进行资源分配和链路管理, 并实施集中化的管理方法减轻干扰问题^[22]。但对于将来的 5G 车载单元之间的直接通信, 在没有基站作为中继或者管理链路的情况下, 5G 车联网通信中的干扰不可避免^[23]。

表 3 分析了在 5G 移动通信网络与基于 D2D 通信网络中的干扰管理方法及其特点。为了处理将来 5G 移动通信网中的干扰问题, 文献[24]提出了 2 种技术: 先进的接收机技术和联合调度技术。其中, 先进的接收机技术不仅处理了位于小区边缘的小区之间的干扰, 而且在大规模多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)状况下, 也解决了小区内的干扰。联合调度技术被广泛应用于蜂窝系统和链路多变网络的干扰管理。但在多点协作机制中, 传输速率和多小区的传输方案不能自行控制, 在实现快速的网络分布和互联互通时, 利用联合调度实施先进的干扰管理方案需要 5G 通信系统严格规定。

针对 5G 终端之间基于 D2D 通信网络中产生的干扰, 文献[25]提出了 2 种资源分配方法: 一种是在 D2D 与其他终端设备之间分配正交资源, 这是一种静态分配方法; 另一种是在 D2D 与其他终端设备之间分配并行资源, 这是一种动态分配方法, 可以更高效地使用无线电资源, 但它可能会带来新的干扰问题。针对车联网中基于 D2D 的

V2X 通信场景中产生的干扰问题, 文献[2]提出一种基于 CR 的资源配置方案, 这种方法有效使用空白频谱, 不仅提高频谱和能源的利用效率, 而且不会产生新的干扰问题。当通过控制功率来处理基于 D2D 的 V2V 通信场景中产生的干扰问题时, 为了不对车载移动通信网中 OBU 或者其他蜂窝用户通信产生严重干扰, 基于 D2D 通信的 OBU 需要检测在每个信道上相应的功率值。当 OBU 复用蜂窝通信用户的上行通信链路资源时, 其发射功率应满足

$$\frac{P_{t_c} C^{-\alpha}}{P_{t_w} D^{-\alpha} + N} \geq \beta_{BS} \quad (6)$$

$$(\mathcal{K} - 1)ND^{\alpha} \geq P_{t_w} \quad (7)$$

其中, P_{t_c} 是蜂窝通信用户的发射功率, N 是噪声的功率数值, P_{t_w} 是基于 D2D 的 V2V 通信的发射功率, α 表示路径损耗的参数值, D 是基于 D2D 的 V2V 通信链路发送端与基站之间的距离, C 是蜂窝通信用户与基站之间的距离。

总之, 在基于 D2D 的 V2X 通信场景中, 要从各个角度充分考虑干扰管理问题, 适当地选择复用信道并遵守以下原则: 1) 处理由 D2D 通信链路产生的干扰, 要确保蜂窝用户能够满足自身 SINR 的需求; 2) 确保由蜂窝用户产生的干扰对基于 D2D 的 V2X 通信链路影响尽可能地小^[26]。

4.2 安全通信和隐私保护

在车联网发展的过程中, 安全作为一项重要挑战一直备受关注。在当前的车联网通信中存在严重的安全问题, 例如, 在 VANET 中可能存在恶意的车辆, 这些恶意的车辆发送虚假信息欺骗其他车辆, 造成车辆信息和车主隐私信息的泄露, 另外, 一些恶意的车辆还会偷窃多个身份, 伪造交通场景, 影响交通秩序、破坏网络正常运行,

表 3

5G 通信干扰管理方法分析

干扰来源	处理方法	应用	方法特点
5G 移动通信网中的干扰	先进接收机技术	用户设备端干扰	抑制位于小区边缘的小区之间的干扰并减轻小区内的干扰
	联合调度	网络端干扰	用于网络端的链路自适应, 但在多点协作机制, 传输速率和多小区方案不能自行控制
基于 D2D 的通信网络中产生的干扰	正交资源分配	D2D 与其他终端设备之间	一种静态资源分配, 不会产生新的干扰问题
	并行资源分配	D2D 与其他终端设备之间	一种动态资源分配, 实现频谱的高效利用, 但会产生新的干扰问题
	基于 CR 的资源分配	基于 D2D 技术的 V2V 通信场景	有效使用空白频谱, 提高频谱的利用效率, 不会产生新的干扰问题

威胁用户生命财产安全, 因此安全认证和隐私保护是车联网发展的焦点问题。

为了支持数据流量的不断增加, 5G 无线网络需要更高的容量和高效的安全机制。而在 5G 网络通信体系中, 终端用户和不同的接入点之间需要更加频繁的认证以防止假冒终端和中间人的攻击。5G 车联网的用户和车辆相关数据的传输需要经过其他车载单元、移动终端以及基站, 因此, 必须采取有效措施保证通信的安全性和数据的完整性。为了解决车联网通信中所面临的安全问题, 早期提出了一些安全认证方案, 包括基于公钥基础设施 (PKI, public key infrastructure) 的认证^[27]、基于身份签名 (identity-based signature) 的认证^[28]、基于群签名 (group signature) 的认证^[29]、基于保密的访问控制^[30]等。近期, 针对 5G 安全通信问题, 文献[15]提出将 SDN 技术用于 5G 移动通信网络, 其中, SDN 的主要特点是将网络控制面与数据面分离, 促进 5G 网络智能化和可编程性, 实现高效的安全管理。文献[31]研究了用于控制 ad hoc D2D 网络并在 ad hoc 环境下基于群密钥协商方法管理群密钥的 ad hoc D2D 协议。此外, 为了在窃听者存在的场景下提高可靠的传输速率, 文献[32]研究了一种用于 D2D 无线通信中设备自适应地选择协作通信机制和基于协作架构的最优功率分配的分布式算法。

在 5G 车联网复杂的通信过程中必须实施多方安全认证。如图 6 所示, 5G 车联网实施的多方安全认证主要包括车内无线局域网中用户移动终端与 5G 车载单元 OBU 的强安全认证, 车际网中车与车之间、车与行人之间、车与中继 (5G 移动

终端或者车载单元) 之间以及车与 5G 基站之间的安全认证。

在保证通信安全过程中, 驾驶人员更关心的是隐私的安全性, 这关系到车联网能否被市民接受并广泛使用。在通信过程中, 车辆无线信号在开放的空间中传输, 容易被窃取并暴露车辆和用户的身份, 若车内数据总线网络遭入侵, 可能造成不可预估的灾难, 如何保障用户和车辆的隐私安全, 成为近年来的研究热点。除了使用近期提到的匿名算法, 如采用动态匿名方案^[33], OBU 在一定时间间隔或当车辆进入不同区域后都要更换匿名, 排除通过对匿名收集、分析而捕获车辆真实身份的攻击。考虑到 5G 车联网多种异构网络的存在, 将会出现新型的安全通信与隐私保护协议^[2]。文献[15]研究了在 5G 终端通信中利用 SDN 技术, 根据数据流的敏感度级别, 为数据流选择多种传输路径, 在接收端, 只有接收者可以用私人密钥解密并重组来自多个网络传输路径的数据流, 从而避免隐私在无线接入点泄露。

随着计算机的计算能力不断突破, 尤其是量子技术的逐渐成熟, 传统基于计算能力的高层加密技术变得不牢靠。基于香农信息论的物理层安全技术对计算复杂度依赖性低, 窃听者即使拥有较强的计算能力也不会对系统的安全性能产生巨大的影响。随着物理层安全研究的不断深入, 较强的抵制窃听能力使其成为高层加密安全的一种有效补充, 进一步增强通信系统的安全性。系统的保密容量 C_s 可以表示为用户信道容量与窃听用户信道容量之差

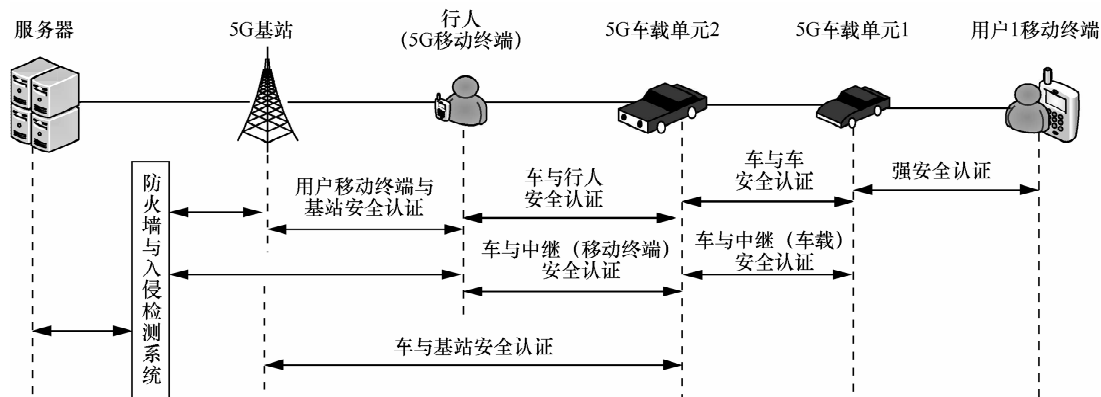


图 6 5G 车联网多方安全认证

$$C_S = C_M - \max_{i=1 \dots t} \{C_{E_i}\} \quad (8)$$

其中, C_M 为起始节点到目的节点的主信道容量, C_{E_i} 为第 i 个窃听者的信道容量。

其中, 物理层安全技术车联网安全通信系统中同样发挥着重要的作用。车联网通信中多个窃听者的存在以及车辆节点在通信网络中快速地连通与中断, 使安全密钥分发与管理成为亟待解决的问题。针对该问题, 本文认为可以采用一种基于物理层安全的密钥分发方法, 将密钥分发和传输安全车载数据分离。在密钥分发阶段, 采用相应的物理层安全方案来最大程度确保密钥分发信道的安全性。当密钥分发完成后, 利用分配的密钥对车载数据进行加密后传输, 该方案可以保证密钥分发过程的安全性。

在 5G 车联网通信系统中, 物理层安全通过融合 5G 先进技术保证数据的机密性和可靠性, 其中异构网络、大规模多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output)、毫米波通信技术在物理层安全有巨大的应用前景。

1) 5G 车联网中, 车辆作为异构网络中设备层的节点可通过 D2D 通信链路与其他设备直接通信或通过中继节点实施多跳通信。在异构网络设备层通信模式下, 邻近的车辆以及其他终端节点都可能是潜在的窃听者, 为保证通信数据的安全性, 一方面要充分考虑非目的车辆和设备节点的相关物理层特性, 另一方面需要确立 D2D 通信最优的中继选择方案, 充分考虑可靠的安全通信机制。其中, 可以使用基于可信设备列表的封闭式接入方法来保证车辆和设备节点数据在交换过程中的安全性, 但由于高速运行的车辆节点需要在有效的通信范围内快速建立连接并进行大文件传输, 还要充分考虑通信时延和中断概率。此外, 在异构网络中, 基站作为车联网重要的路边基础设施, 其适当的部署密度可优化保密速率。

对于车联网物理层安全的评估, 本文考虑如图 7 所示的基于 D2D 的 V2V 通信异构网络物理层安全系统模型, 该模型所示的车联网场景中 N 个蜂窝用户 (主要包括手机移动终端和车载终端) 集合为 $n = \{user1, user2, \dots, userN\}$, 它们利用不同的信道通信, 其中, 基于 D2D 的 V2V 通信链路被窃听者 (恶意的车辆或者个人) 窃听。 P_{VV} 是 V2V 通信链路的发射功率, h_{VE} 是由 V2V 通信链

路的发送端到接收端的信道增益, h_{VE} 为基于 D2D 的 V2V 通信链路的发送端到窃听者的信道增益, h_{BE} 是基站发到窃听者的信道增益, h_{BV} 为从基站到基于 D2D 的 V2V 通信接收端的信道增益, 窃听者接收的信号为

$$Y_E = \sqrt{P_{C_i}} h_{C_i E} x_{C_i} + \sqrt{P_{VV}} h_{VE} x_{V_i} + N_0 \quad (9)$$

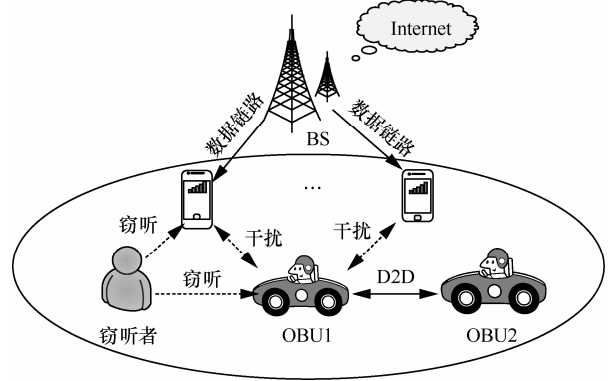


图 7 V2V 通信异构网络物理层安全系统模型

窃听信道的信道容量为

$$C_E = \text{lb} \left(1 + \frac{P_{C_i} h_{C_i E} + P_{VV} h_{VE}}{P_{BS} h_{BE} + N_0} \right) \quad (10)$$

基于 D2D 的 V2V 通信链路的保密容量为

$$C_{VS} = \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{VV} h_{VV}}{P_{BS} h_{BV} + N_0} \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{P_{VV} h_{VE}}{P_{BS} h_{BE} + N_0} \right) \right]^+ \quad (11)$$

其中, $[\cdot]^+ = \max\{\cdot, 0\}$, h_{VE} 满足指数分布, 即

$$v(h_{VE}) = \frac{1}{k} e^{-\frac{1}{k} h_{VE}} \quad (12)$$

当系统中不存在基于 D2D 的 V2V 通信用户时, 蜂窝用户不会与其他的用户共享信道资源, 则蜂窝用户的保密容量为

$$C_{C_i} = \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{C_i} h_{C_i B}}{P_{BS} h_{BC_i} + N_0} \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{P_{C_i} h_{C_i E}}{P_{BS} h_{BE} + N_0} \right) \right]^+ \quad (13)$$

图 7 中异构网络系统的保密容量为

$$C = \sum C_{C_i} + \sum C_{VS} \quad (14)$$

通过构造 Stackelberg 博弈框架, 考虑对基于 D2D 的 V2V 通信的物理层安全需求和干扰支出, 可对 V2V 通信进行优化^[34]。V2V 通信用户的效用函数表示为

$$u_{c,n} = \left[\lg \left(1 + \frac{P_{VV} h_{VV}}{P_B h_{BV} + N_0} \right) - \lg \left(1 + \frac{P_{VV} h_{VE}}{P_B h_{BE} + N_0} \right) \right]^+ - \alpha P_{VV} h_{VC} \quad (15)$$

其中, α 是价格因子。

针对图 7 的异构网络安全评估模型和不存在基于 D2D 的 V2V 通信链路的系统模型的保密容量进行仿真, 其中, 本文只考虑路径损耗, 忽略小尺度的衰落, 窃听器与基站之间的距离设置为 60 m, 仿真结果如图 8 和图 9 所示。从结果可以看出, 在没有基于 D2D 的 V2V 的通信链路状况下, 随着蜂窝用户 (包括车载终端和移动终端用户) 的增加, 系统的保密容量也增大。而对于图 7 所示的存在蜂窝用户和基于 D2D 的 V2V 通信链路的异构网络系统模型, 假设存在蜂窝用户数量为 30, 仿真结果表明, 系统的保密容量随 V2V 用户对数量的增加而增长, 当 V2V 用户对数量增长到一定程度时, 系统的保密容量将达到最大值。从图 8 和图 9 仿真结果的对比可以得出, D2D 通信链路对于增加系统的保密容量发挥重要作用。本文通过参照图中保密容量最大值对应的用户数量部署车联网系统, 尽可能增加系统的保密容量。

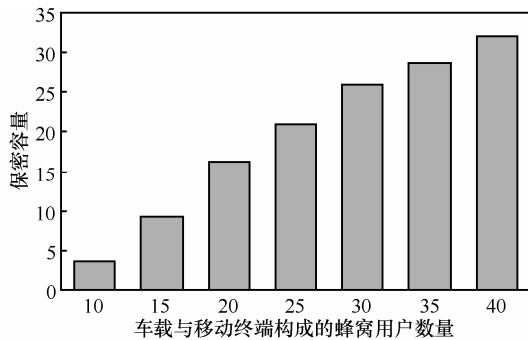


图 8 对不存在基于 D2D 的 V2V 通信链路的系统保密容量仿真结果

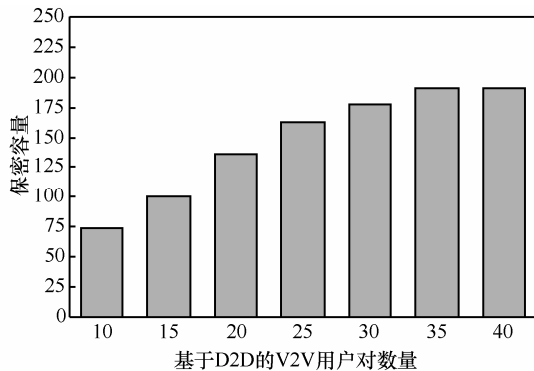


图 9 基于异构网络系统的保密容量仿真结果

2) 大规模 MIMO 系统可通过以下两方面保证车联网物理层安全性能: 一方面通过降低传输功率, 进一步降低窃听车辆和设备节点的 SINR, 从而减少窃听节点的信道容量^[35]; 另一方面, 根据车辆节点物理层特性, 适当地增加人工噪声干扰窃听节点的信号接收, 从而提高物理层安全性能。

3) 毫米波通信技术应用于车联网短距离通信场景, 可给予车联网较大的带宽^[36], 由于毫米波的短距离传输, 利用窄波速的定向通信抑制相邻车辆和设备节点的干扰, 邻近窃听节点的 SINR 可能会降低。

正是由于多异构网络融合以及灵活的终端通信, 使 5G 车联网在安全通信方面的保障不同于当前车联网。5G 车联网不仅通过技术的创新解决 OBU 多功能实施带来的安全隐患, 并且在出现网络异常或者入侵时, 利用网络隔离原理及时地在车载移动互联网与 VANET 之间切换, 从而切断 OBU 的互联网连接, 阻止网络的入侵, 并通过 VANET 中邻近的 OBU 或者 5G 移动终端等其他渠道接入互联网, 维持与互联网的通信。通过这种车辆自组网和车载移动互联网无缝的切换, 实现了 OBU 与互联网安全通信和信息交互。

4.3 安全驾驶

车联网重要应用之一就是交通安全, 而驾驶行为分析和预测是安全保障的基础, 如何对运动轨迹预测并建模是提高交通安全的关键问题。虽然车联网中网络拓扑频繁变化, 数据海量递增, 但车辆运动受道路拓扑、交通规则和驾驶者意图的限制, 为行为预测提供了可能性。文献[37]研究了 VANET 中存在的社会特性, 发现 VANET 是拥有小型世界现象和高聚集效应的网络, 处于同一个社会网络中的任意节点可以通过不超过 3 跳的最短路径达到另一节点。而 5G 会推动车联网规模的发展, 加剧了车联网的这种社会效应。

车联社会网络 (VSN, vehicular social network) 中节点的活动规律能够在车联网行为预测中发挥作用。反之, 车联网中的移动模型、社会应用、感知计算模型和用户行为预测模型也为 VSN 提供支持和反馈。通过对大规模 OBU 数据的挖掘和分析, 提取有应用价值的社群交互特征信息, VSN 能够对一些交通问题和车辆安全问题提供有力的支持, 如预计道路车流量、预测交通

堵塞地段、主动安全等^[38]。

在对驾驶行为的建模和预测中,数据来源和数据挖掘是首要问题,也是安全系统应用的瓶颈。目前,车辆行驶轨迹数据获取的主要来源是基于历史数据的预测,而历史数据必须准确且具有时效性。但现有 VANET 环境下的方法无法满足获取运动轨迹的精度要求(包括位置精度和时间精度),5G 车联网中采用 D2D 通信方式,可为每个用户提供每秒千兆级的数据速率以满足 QoS 的要求,空口时延在 1 ms 左右、端到端时延限制在毫秒级的实现,极大程度上保证了时间精度,同时,基于 5G 基站的精确定位将位置精度控制在允许范围内,解决了预测模型中的数据来源问题。目前,针对车联网数据挖掘,并没有太多的算法和技术提出,车联网数据处理的关键是在对海量数据(TB 级)进行挖掘时,要保证当前数据流(平均数万条/秒)的高速可靠写入,如何快速对读取的数据进行分析、建模、预测,是未来研究的重要方向。

5 5G 车联网发展趋势与应用

将来,在 5G 通信网络大量部署的时代,5G 车联网所构建的可多网接入与融合、多渠道互联网接入的体系结构,基于 D2D 技术实现的新型 V2X 的通信方式以及低时延与高可靠性、频谱与能源高效利用、优越的通信质量等特点为车联网的发展带来历史性的机遇。5G 车联网因为不需要单独部署路边基础设施、可以和移动通信功能共享计费等,会得到快速发展,应用于高速公路、城市街区等多种环境。5G 车联网不仅局限于车与车、车与交通基础设施等信息交互,还可应用于商业领域以及自然灾害等场景。

在商业领域,商店、快餐厅、酒店、加油站、4S 店等场所将会部署 5G 通信终端,当车辆接近这些场所的有效通信范围时,可以根据车主的需求快速地与这些商业机构间建立 ad hoc 网络,实现终端之间高效快捷的通信,从而可以快速订餐、订房、选择性地接收优惠信息等,且在通信过程中不需要连接互联网。这将取代目前商业机构中工作在不授权频段、通信不安全、通信质量无法保障、干扰无法控制的蓝牙或者 Wi-Fi 通信方式,也将带动一个新的大型商业运营模式的产生与发展。

毫无疑问,随着车辆的大量普及,车辆已经成为人在家、办公室之外最重要的活动场合。然而,在地震、泥石流等自然灾害发生地区,当通信基础设施被破坏、无法为车载单元提供通信服务时,有相当数量的人可能是正在车辆上或正准备驾乘车辆离开,5G 车载单元可以在没有基础设施协助的情况下,通过基于单跳或多跳的 D2D 方式与其他 5G 车载单元通信。另外,5G 车载终端也可以作为通信中继,协助周边的 5G 移动终端进行信息交互。

6 结束语

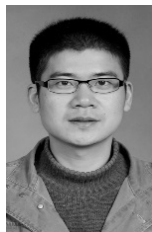
车联网正在改变人类交通和通信方式,促使车辆向网络化、智能化发展。本文分析了当前车联网面临的问题,将 5G 通信技术应用于车联网场景,提出了新型 5G 车联网体系结构。系统介绍了 5G 车联网独有的特点,并客观分析了 5G 车联网中仍需解决的问题,力图展示 5G 车联网的未来趋势,为车联网研究提供方向。相信 5G 车联网的研究可以促进社会的巨大演进,使人类社会更加方便、安全、快捷、高效。

参考文献:

- [1] MERSHAD K, ARYAIL H. A framework for secure and efficient data acquisition in vehicular Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(2): 536-551.
- [2] MUMTAZ S, SAIDUL HUP K M, ASHRAF M L, et al. Cognitive vehicular communication for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(7): 109-117.
- [3] VINEL A, MA X, HUANG D. Guest editors' introduction: special issue on reliable and secure VANETs[J]. IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing, 2016, 13(1):2-4.
- [4] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [5] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86-92.
- [6] OSSEIRAN A, BOCCARDI F, BRAUN V, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 26-35.
- [7] QIAO J, SHEN X M, MARK J, et al. Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 209-215.
- [8] ENGOULOU R G, BELLAICHE M, PIERRE S, et al. VANET security surveys[J]. Computer Communications, 2014, 44(5): 1-13.
- [9] SHIVALDOVA V, SEPULCRE M, WINKELBAUER A, et al. A model for vehicle-to-infrastructure communications in urban environments[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). c2015:2387-2392.
- [10] DAMMANN A, RAULEFS R, ZHANG S. On prospects of posi-

- tioning in 5G[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). c2015: 1207-1213.
- [11] PHAN-HUY D, STERNAD M, SVENSSON T. Making 5G adaptive antennas work for very fast moving vehicles[J]. Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015, 7(2): 71-84.
 - [12] HAIDER F, WANG H M, HAAS H, et al. Spectral efficiency analysis of mobile femtocell based cellular systems[C]//IEEE 13th International Conference on Communication Technology (ICCT). c2011:347-351.
 - [13] RUSEK F, PERSSON D, BUON K L, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
 - [14] CATTONI A F, CHANDRAMOULI D, SARTORI C. Mobile low latency services in 5G[C]// IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). c2015: 1-6.
 - [15] DUAN X Y, WANG X B. Authentication handover and privacy protection in 5G hetnets using software-defined networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 28-35.
 - [16] SHENG M, LI Y, WANG X, et al. Energy efficiency and delay tradeoff in device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1):92-106.
 - [17] ZHANG X, CHENG W C, ZHANG H L. Heterogeneous statistical QoS provisioning over 5G mobile wireless networks[J]. IEEE Network, 2014,28(6):46-53.
 - [18] AKHTAR A M, WANG X, HANZO L. Synergistic spectrum sharing in 5G HetNets: a harmonized SDN-enabled approach[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(1):40-47.
 - [19] PATCHARAMANEPAKORN P, WU S, WANG C X, et al. Spectral, energy and economic efficiency of 5G multi-cell massive mimo systems with generalized spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016:1.
 - [20] YANG H, MARZETTA T L. Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 172-179.
 - [21] BISWAS S, MASOUIROS C, RATNARAJAH T. Performance analysis of large multi-user mimo systems with space-constrained 2D antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016:1.
 - [22] DOPPLER K, YU C H, RIBEIRO C B, et al. Mode selection for device-to-device communication underlying an LTE-advanced network[J]. IEEE Xplore, 2010, 29(16):1-6.
 - [23] WEN S, ZHU X Y, LIN Y C, et al. Achievable transmission capacity of relay-assisted device-to-device (D2D) communication underlying cellular networks[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. c2013: 1-5.
 - [24] WOOSEOK N, DONGWOON B, JUNGWON L, et al. Advanced interference management for 5G cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 52-60.
 - [25] MUMTAZ S, SAIDUL HUQ K M, RODRIGUEZ J. Direct mobile-to-mobile communication: Paradigm for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(5): 14-23.
 - [26] REN Y, LIU F Q, LIU Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
 - [27] GAO Z, HU Y, LU K. CPTIAS: a new fast PKI authentication scheme based on certificate path trust index[J]. Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing, 2015, 6(6):721-731.
 - [28] CALANDRIELLO G, PAPADIMITRATOS P, HUBAUX J P, et al. Efficient and robust pseudonymous authentication in VANET[C]// The 4th International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, ACM. c2007:19-28.
 - [29] ZHU X L, YANG L U, HOU Z F, et al. Strong privacy protection scheme based on oblivious transfer and group signature in VANET[J]. Application Research of Computers, 2014.
 - [30] YUE J T, MA C, YU H, et al. Secrecy-based access control for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2068-2071.
 - [31] JUNG Y, FESTIJO E, PERADILLA M. Joint operation of routing control and group key management for 5G ad hoc D2D networks[C]//International Conference on Privacy and Security in Mobile Systems (PRISMS). c2014: 1-8.
 - [32] GHANEM S, ARA M. Secure communications with D2D cooperation[C]//IEEE International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA). c2015: 1-6.
 - [33] LIU Y L, WANG L M, CHEN H. Message authentication using proxy vehicles in vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 64(8): 3697-3710.
 - [34] LUO Y J, CUI L, YANG Y, et al. Power control and channel access for physical-layer security of D2D underlay communication[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), IEEE. c2015: 1-5.
 - [35] KONG Z, YANG S, WU F, et al. Iterative distributed minimum total MSE approach for secure communications in MIMO interference channels[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2016, 11(3):594-608.
 - [36] BOGALE T E, LE L B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: potential benefits and challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(1):64-75.
 - [37] LIU X, LI Z, LI W, et al. Exploring social properties in vehicular ad hoc networks[C]//The 4th Asia-Pacific Symposium on Internetware. c2012:1-7.
 - [38] VEGNI A, LOSCRI V. A survey on vehicular social networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2397-2419.

作者简介:



王良民 (1977-), 男, 安徽潜山人, 江苏大学教授、博士生导师, 主要研究方向为密码学与安全协议、物联网安全、大数据安全。

刘晓龙 (1992-), 男, 山东滕州人, 江苏大学硕士生, 主要研究方向为车联网安全与隐私保护。

李春晓 (1982-), 女, 山东聊城人, 博士, 扬州大学讲师, 主要研究方向为信息与通信工程。

杨晴 (1982-), 女, 山东泰安人, 博士, 扬州大学副教授, 主要研究方向为无线中继通信、认知无线电、大规模 MIMO。

杨卫东 (1977-), 男, 内蒙古集宁人, 博士, 河南工业大学副教授, 主要研究方向为车联网、信息安全。