



专题：5G 组网与 6G 展望

5G 蜂窝车联网组网性能研究

王君, 纪晓东, 张欣然, 温晓然, 佟佳俊
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 蜂窝车联网 (cellular vehicle to everything, C-V2X) 是智能交通系统的关键技术之一, 车辆通过与周围的信息实体实时交换信息以实现保障城市交通安全、提高城市交通效率等目的, 实现 V2X 通信的基本需求。在 NR-V2X 定义的场景中, 它还将支持自动驾驶、远程驾驶、车辆编队、扩展传感四大类先进 V2X 服务。通过 OPNET 搭建 5G-V2X 系统级仿真平台, 针对基于 PC5 接口和 Uu 接口的车联网通信两大通信模式对 5G 蜂窝车联网的系统性能进行分析研究, 给出相应的性能分析和评估结果, 并提出改进建议, 对 5G 蜂窝车联网的研究方向和实际系统部署都具有重要的指导作用。

关键词: 蜂窝车联网; 5G-V2X; V2N; 性能估计

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020009

Performance evaluation of 5G cellular vehicle networks

WANG Jun, JI Xiaodong, ZHANG Xinran, WEN Xiaoran, TONG Jiajun
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Cellular vehicle networks (C-V2X) is one of the key technologies of intelligent transportation systems. Vehicles exchange information with surrounding information entities in real time to ensure traffic safety and improve traffic efficiency, which meets the basic demands of V2X communication. Besides, it will be applied to automatic driving, assisting driving and other advanced scenarios in the NR-V2X scene. 5G-V2X system-level simulation platform was developed through opnet. For different application scenarios, coverage performance of 5G C-V2X was analyzed based on simulation results, and suggestions for improvement were given, which has important directive to production practices for the research and system deployment of 5G-V2X.

Key words: cellular vehicle network, 5G-V2X, V2N, performance evaluation

1 引言

第五代移动通信技术 (5th generation mobile networks, 5G) 被认为是改变人们未来生活的关键技术, 为支持其发展, 各个领域进行了大量的

研究^[1-3]。车联网是智能交通系统的关键技术之一^[4], 在 5G 移动通信技术中扮演重要角色, 其基本要求是通过车辆之间的可靠通信保障城市交通安全。车辆、行人和基础设施可以收集有关环境的信息并实时与其他附近的实体交换, 因此可以通知潜



在危险情况，保障城市交通安全，实现车联网通信的基本需求^[5]。在 5G-V2X 的应用场景中，定义了 3 类 V2X 服务场景^[6]：第一，支持非安全相关的 V2X 服务，例如移动高速率数据传输、移动热点、动态数字地图更新等；第二，支持安全相关 V2X 服务，包括车联网基本需求及自动驾驶、远程驾驶、车联编队、扩展传感四大先进 V2X 服务；第三，支持多种 3GPP 无线接入技术，如 LTE、new RAT（NR），支持与多种网络环境协作，包括非 3GPP 的 V2X 技术，如 DSRC^[7]。车联网的工作模式可分为两大类，第一类是基于 PC5 接口的车辆与车辆（vehicle-to-vehicle, V2V）直接通信，主要针对车联网通信的安全相关的基本需求；第二类是基于 Uu 接口的车辆与基站（vehicle-to-network communication, V2N）进行通信，主要针对先进 V2X 服务及非安全相关的 V2X 服务等高吞吐量需求服务。

3GPP 的 C-V2X 通信标准化分为 3 个阶段^[8]。第一阶段工作从 2015 年 2 月开始，主要从基础业务需求、系统架构、安全研究和空口技术 4 个方面开展，并首次定义了包括车车、车路、车人以及车与网络通信的 27 个应用场景。第二阶段从 2017 年 3 月开始，定义了车联网通信的五大业务需求，包括车辆编队、半自动驾驶、扩展传感、远程驾驶四大先进 V2X 服务和基本需求。另一方面，研究并评估支持 LTE-V2X 业务的增强技术方法，主要从载波聚合、发送分集、高阶调制、资源池共享及减少时延等关键增强技术进行研究，同时，3GPP RAN 开始进行 V2X 服务相关性能评估的方法研究，确定性能评估指标及参数。在 2018 年 6 月正式启动第三阶段 NR-V2X 的研究，一方面根据第二阶段确定的性能评估方案对 NR-V2X 进行系列的性能评估；另一方面对支持 NR-V2X 的一系列关键技术开展了丰富的研究。物理层的讨论主要从帧结构、子载波间隔、CP 等方面展开，

目前的讨论结果见表 1。

表 1 NR-V2X 物理层子载波间隔及 CP 长度

频率范围	支持子载波间隔	CP 长度
6 GHz 及以下	15 kHz、30 kHz、60 kHz	normal CP
	60 kHz	extend CP
6 GHz 以上	60 kHz、120 kHz	normal CP
	60 kHz	extend CP

同步方式方面，NR-V2X 的同步源包括 GNSS（global navigation satellite system，全球导航卫星系统）、gNode B（NR 基站）、eNode B（evolved node B），与 LTE-V2X 相比新增了 gNode B 同步方式，其中当 eNode B 作为 NR UE 的同步源时，需要当前 NR UE 支持 LTE Uu 接口或 PC5 接口。资源分配方面，NR-V2X 支持 Mode 1 和 Mode 2 两种资源分配方案：Mode 1，基站为车辆 UE 调度资源以完成数据传输；Mode 2，UE 自主地进行资源选择，包括 UE 自主选择资源和 UE 辅助其他 UE 进行资源选择，通过 NR configured grant 对副链路的传输进行配置，UE 调度其他 UE 的资源进行传输有 4 种方式。此外，关于副链路控制信道（physical sidelink control channel, PSCCH）与副链路共享信道（physical sidelink shared channel, PSSCH）的复用及与反馈信道（physical sidelink feedback channel, PSFCH）相关的技术以及 LTE-V2X 与 NR-V2X 共存等相关的问题还在进一步讨论中。

本文将根据 3GPP 定义的蜂窝车联网应用场景的性能评估方法^[9]，针对 5G-V2X 安全相关的服务和先进 V2X 服务，对车联网的覆盖性能进行评估。主要贡献包括：通过搭建 5G-V2X 系统级仿真平台^[10]，从系统级的角度考虑^[11]，针对不同的通信模式及实际场景，研究业务负载、车辆密度对系统性能的影响，并与 3GPP 目标可靠性进行比较，给出相应的性能分析和评估结果，并提出改进建议。

2 系统模型

车联网的工作模式分为两大类, 基于 PC5 接口的车辆与车辆 (vehicle-to-vehicle, V2V) 或车辆与路边设备 (vehicle-to-infrastructure, V2I) 直接通信和基于 Uu 接口的基站与车辆 (vehicle-to-network, V2N) 之间的通信, 城区场景与高速场景是车联网通信的两大实际场景, 本文将主要在此两大实际场景中进行相关的性能研究。

2.1 系统级仿真设计

高速场景中, 车辆用户分布在长为 10 392 m、宽为 24 m 的双向 6 车道高速公路上。城区场景模拟曼哈顿网格, 一共 9 个街区, 每个街区的面积为 250 m×433 m, 街道及宏基站的部署如图 1 所示, 每条街道为 14 m 宽的双向 4 车道, 且包含 3 m 步行区域。高速场景和城区场景中车的前后车间距服从均值为 $\lambda = 2V_{\text{车}}$ 的指数分布, 其中, $V_{\text{车}}$ 为车辆的移动速度, 即不同的车辆移动速度将导致不同的车辆密度。基于 PC5 接口的 V2V 通信, 其路径损耗和阴影衰落模型如 TR37.885^[9] 中所示, 基于 Uu 接口的 V2N 通信, 其路径损耗和阴影衰落模型如 TR38.901^[12] 中所示。接收用户信干扰比可表示为:

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{tx}} \times G_{\text{antenna}} / (L_{\text{pathloss}} \times L_{\text{shadowing}})}{P_{\text{interference}} + P_{\text{noise}}} \quad (1)$$

其中, P_{tx} 为发送信号功率, G_{antenna} 为天线增益, L_{pathloss} 为路径损耗, $L_{\text{shadowing}}$ 为阴影衰落, $P_{\text{interference}}$ 为干扰功率, P_{noise} 为噪声功率。在基于 PC5 接口的 V2V 场景中, 由于所有发送车辆使用相同的频率资源, 因此接收用户受到的干扰来源于其他发送用户的同频干扰, 即与当前发射用户在同一时频资源块上发送信息的其他发射用户产生的干扰。在基于 Uu 接口的 V2N 场景中, 同一小区覆盖范围内的发送车辆所占用的资源完全正交, 因此接收用户受到的干扰来源于小区间干扰, 即与

当前发送消息的小区占用同一时频资源的其他小区。

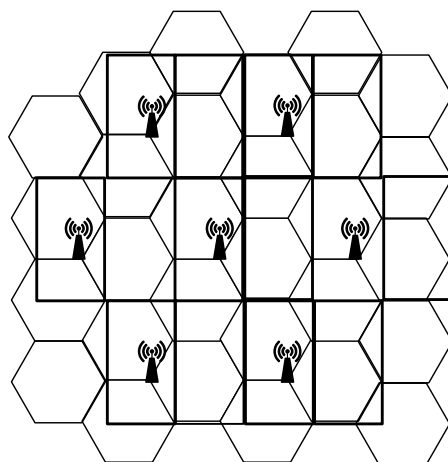


图1 城区场景网络拓扑及车道位置部署

2.2 基于 PC5 接口的车联网通信模式

基于 PC5 接口的 V2V 通信模式如图 2 所示, 车辆用户的接收与发送服从半双工数据传输方式, 发送用户使用广播机制通过副链路 (sidelink) 将 V2V 信息传输给位于一定距离范围内的多个用户, 此通信模式主要适用于安全性服务中的基本需求服务, 例如通知来向车辆路边障碍物等对时延和可靠性要求较高但对吞吐量要求不严格的业务。

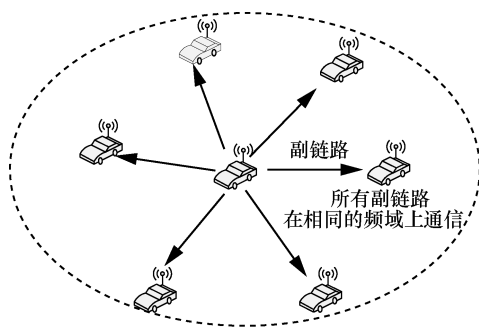


图2 基于 PC5 接口的 V2V 通信

V2V 通信信道为工业和信息化部分分配给 C-V2X 做实际测试的 20 MHz (5 905~5 925 MHz) 带宽, 如图 3 所示, 在频域上它被进一步划分为子信道, 在时域上被划分为子帧, 即 TTI (transmission time interval, 传输时间间隔), 一个

的仿真区域内,通过评估不同应用场景下不同车辆密度、业务模型和业务负载的系统性能,研究该系统的覆盖性能。用户的基础业务模型为周期性业务,采用广播通信机制,该通信系统中主要关注系统的可靠性,因此将接收用户在一定距离范围内的分组接收率(PRR)作为评估指标。3GPP定义V2V通信的目标可靠性(PRR指标)为90%,在高速场景中目标通信距离为320 m,城区场景中目标通信距离为150 m^[6]。具体的仿真参数配置见表4。

表4 V2V通信系统级仿真平台参数配置

仿真参数	参考取值
载波频率	5.915 GHz
系统带宽	20 MHz
车辆发射功率	23 dBm
车辆天线增益	3 dBi
天线配置	4×4 或 8×8
路损模型和阴影衰落	TR37.885 ^[9]
PRB	16
调制方式	业务模型一使用 QPSK; 业务模型二使用 64QAM; 非周期业务模型根据业务分组大小自适应更改调制编码方式
资源调度方式	周期性业务采用基于感知的半持续调度; 非周期性业务采用随机资源选择

图5显示了城区场景和高速场景下车辆在不同移动速度、不同天线配置下的分组接收率随距离的变化趋势,可以看到,分组接收率的性能随着车辆密度的增大呈下降趋势,此性能下降来源于车辆密度增大导致的更密集的资源碰撞。此外,城区场景下的性能远差于高速场景下的性能,一方面,由于城区场景中本身车辆密度较高速场景大;另一方面,城区场景中的路径损耗尤其是非视距状态下的路径损耗,与高速场景相比严重许多^[9],相比之下,城区场

景中的性能提升方案需要被着重考虑。表5显示了当前仿真假设下目标有效通信范围处的分组接收率,可以看到,城区高密度场景的性能达不到V2V通信基本要求的90%,即使采用8×8天线配置也无法满足通信需求。

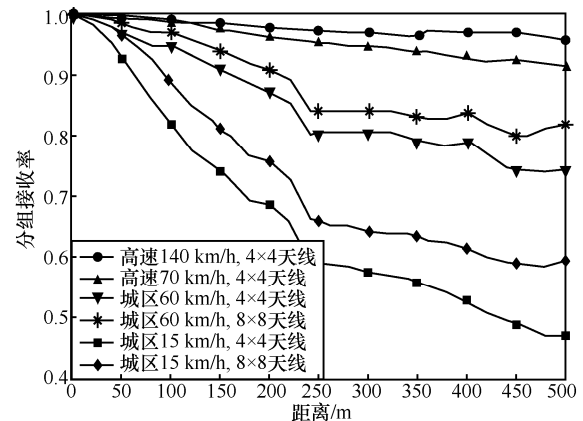


图5 不同场景中不同车辆密度不同天线配置下分组接收率比较

表5 V2V通信在目标有效通信距离处的分组接收率

场景	目标有效通信距离	移动速度	天线配置	PRR
高速	320 m	140 km/h	4×4	97%
		70 km/h	8×8	95%
城区	150 m	60 km/h	4×4	91%
			8×8	94%
		15 km/h	4×4	74%
			8×8	81%

图6~图8分别显示了高速场景和城区场景下不同的车辆密度下不同业务模型、业务负载用户分组接收率随距离的变化趋势。可以看到,周期性业务模型二的性能远比周期性业务模型一的性能差,首先业务量的增加将直接导致更严重的资源碰撞问题,其次由于数据分组的增大,只能采用高阶调制的方式,误比特率变大,系统性能下降。对于周期性业务与非周期性业务混合的场景,一方面,两种业务模型的混合导致业务负载增大,且非周期业务模型数据分组大只能采用高阶调制;另一方面,由于非周期性业务的突发性,只能采取随机的资源选择方式,无法避免自身业务



及周期性业务的干扰，同时，周期性业务无法通过感知干扰进行避免，使得周期性业务的性能也变差，总体性能变差。

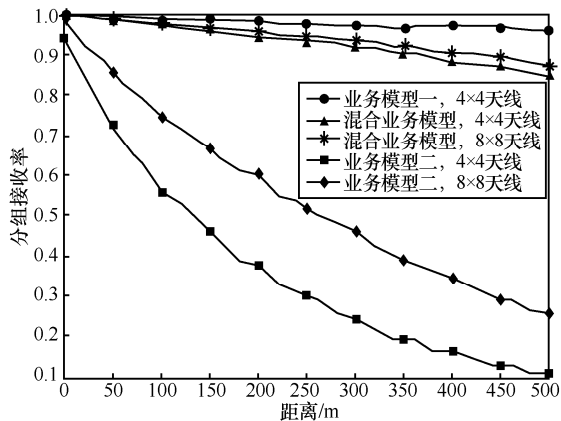


图6 高速场景中车速为140 km/h时不同业务模型不同天线配置下的分组接收率比较

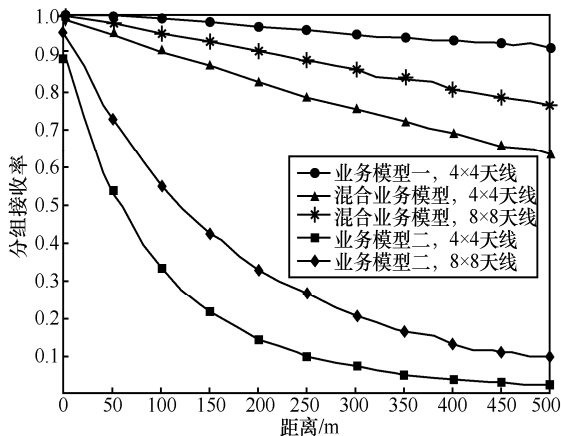


图7 高速场景中车速为70 km/h不同业务模型不同天线配置下的分组接收率比较

表6中统计了以上仿真场景中业务模型二及混合业务模型下在目标通信距离能达到的分组接收率，可以看到，业务模型二场景中均不能实现目标有效通信范围内的有效通信，而混合业务场景中，只有在高速场景中140 km/h移动速度情况下可以实现有效通信，其他场景无法满足V2V通信的基本需求。

通过以上仿真结果可以看出，基于PC5接口的V2V通信系统为干扰受限系统。车辆密度的增大或业务负载升高均会导致车辆间同频干扰增大，

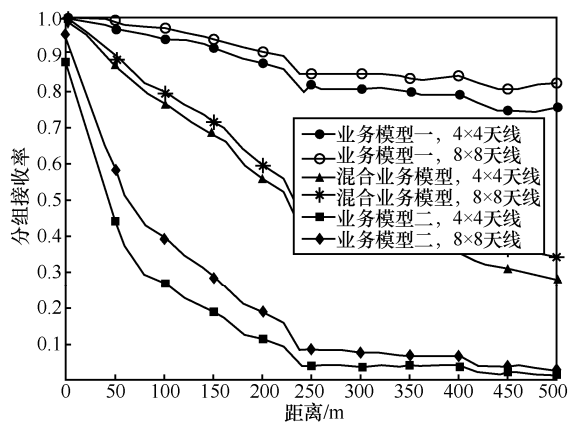


图8 城区场景车速为60 km/h不同业务模型不同天线配置下的分组接收率比较

针对非周期业务模型，可以采取更有效的干扰避免措施提升性能，而城区场景中的高车辆密度或高业务负载场景中，同一时间内处于发送状态的车辆太多，干扰避免机制不能达到理想的效果，需要提供更多的频率资源或采用能支持更多业务传输的关键技术才可能满足V2V通信需求。此外，对于城区场景中的路径损耗问题，针对长距离的传输，可以采用RSU转发等机制来提升性能。

3.2 基于Uu接口的车联网通信性能研究

基于Uu接口V2N下行单播通信的性能评估中，在给定的仿真区域内，通过仿真不同应用场景下不同车辆密度的结果，对仿真结果进行分析得到不同车辆密度下的系统性能差异^[14]。由于V2N下行单播方案通常应用在远程驾驶，车辆编队的控制，软件下载等高吞吐量需求的场景中，业务模型采用Full Buffer业务模型，因此将基站吞吐量和用户吞吐量作为系统评估指标。3GPP定义先进V2X业务的目标用户吞吐量要求是30~700 Mbit/s^[15]。本文将评估V2N下行通信系统的吞吐量并与3GPP定义的先进V2X业务目标性能进行比较，具体的仿真参数配置见表7。

图9和表8分别显示了不同车辆密度下的用户吞吐量的累积分布曲线与边缘用户吞吐量

表 6 V2V 通信不同参数配置下不同业务模型在目标有效通信距离处的分组接收率

场景	目标有效通信距离	移动速度	天线配置	业务模型	PRR
高速	320 m	140 km/h	4×4	业务模型二	22%
				混合业务模型	91%
			8×8	业务模型二	42%
				混合业务模型	93%
		70 km/h	4×4	业务模型二	6%
				混合业务模型	73%
			8×8	业务模型二	19%
				混合业务模型	84%
城区	150 m	60 km/h	4×4	业务模型二	18%
				混合业务模型	67%
			8×8	业务模型二	28%
				混合业务模型	71%

表 7 V2N 下单播通信系统级仿真平台参数配置

仿真参数	参考取值
天线配置	4×4
载波频率	4 GHz
系统带宽	20 MHz
蜂窝小区半径	城区场景：288 m；高速场景：1 000 m
平均用户数/基站	城区场景：50 个（60 km/h），133 个（15 km/h）；高速场景：65 个（140 km/h），119 个（70 km/h）
基站发射功率	49 dBm
基站天线增益	参见 TR37.885 ^[9]
路损模型和阴影衰落	参见 TR38.901 ^[12]
业务模型	Full Buffer
调制方式	AMC
HARQ	YES
资源调度方式	RR

及基站吞吐量，从图 9 可以看到，在相同带宽资源下，随着车辆密度的增加，单用户的吞吐量均下降。从表 8 中可以看到，高速场景基站吞吐量可达到 175 Mbit/s，城区场景基站吞吐量

约为 150 Mbit/s，城区场景中由于存在非视距场景，路径损耗更严重，基站吞吐量较差。此外，城区场景与高速场景下边缘用户吞吐量仅能达到 0.48~1.08 Mbit/s。



表 8 高速场景与城区场景中的边缘用户吞吐量

场景	移动速度	边缘用户吞吐量	基站吞吐率
高速场景	140 km/h	1.08 Mbit/s	175.4 Mbit/s
	70 km/h	0.55 Mbit/s	176.1 Mbit/s
城区场景	60 km/h	0.88 Mbit/s	150.3 Mbit/s
	15 km/h	0.48 Mbit/s	152.8 Mbit/s

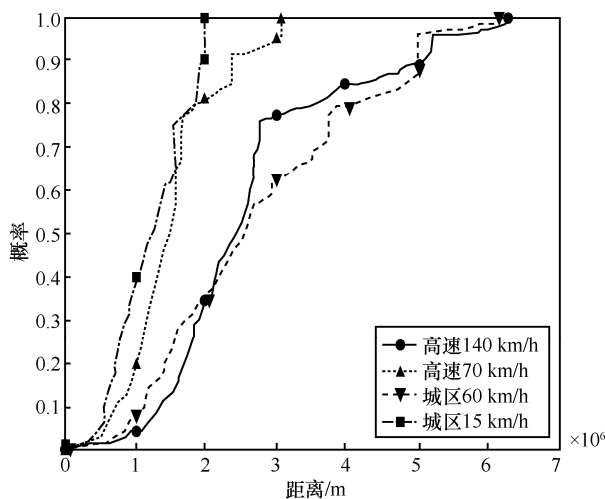


图 9 用户吞吐量的 CDF 曲线

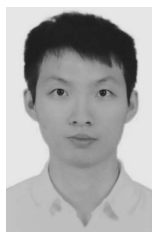
4 结束语

本文研究了 5G 蜂窝车联网基于 PC5 接口的 V2V 通信及基于 Uu 接口的 V2N 通信两种模型下不同应用场景的系统性能，通过系统级仿真得出，基于 PC5 接口的 V2V 通信系统中受发送用户间同频干扰的限制，部分场景的性能尚不能达到 3GPP 要求的 V2V 通信目标可靠性，需要进一步研究有限的干扰避免措施或采用能支持更多业务传输的关键技术以满足 3GPP V2V 通信要求。基于 Uu 接口的 V2N 通信主要应用在先进 V2X 服务中，现有仿真假设下远不能达到其通信需求，采用大规模多天线等关键技术有望实现更高的吞吐量，对于超高吞吐量需求的业务，如自动驾驶、远程驾驶、毫米波技术将可能是进一步研究的方向。

参考文献：

- [1] PENG M, WANG W, CHEN H. TD-SCDMA evolution[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2010, 5(2): 28-41.
- [2] PENG M, WANG Y, DANG T, et al. Cost-efficient resource allocation in cloud radio access networks with heterogeneous fronthaul expenditures[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(7): 4626-4638.
- [3] PENG M, YU Y, XIANG H, et al. Energy-efficient resource allocation optimization for multimedia heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(5): 879-892.
- [4] KARAGIANNIS G, ALTINTAS O, EKICI E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(4): 584-616.
- [5] CHEN S, HU J, SHI Y, et al. Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(2): 70-76.
- [6] Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services: TR22.886 V16.1.1[S]. 2018.
- [7] 5GAA. The case for cellular V2X for safety and cooperative driving[R]. 2016.
- [8] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 1-11.
CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 1-11.
- [9] Study on evaluation methodology of new vehicle-to-everything V2X use cases for LTE and NR: TR37.885 V15.0.0[S]. 2018.
- [10] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 71-76.
HE Z J, AI Y, YAN S, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 71-76.
- [11] WANG Y, XU J, JIANG L. Challenges of system-level simulations and performance evaluation for 5G wireless networks[J]. IEEE Access, 2014(2): 1553-1561.
- [12] Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38.901 V15.0.0[S]. 2018.

- [13] PENG M G, ZHANG K C. Recent advances in fog radio access networks: performance analysis and radio resource allocation[J]. IEEE Access, 2016(4): 5003-5009.
- [14] NR Uu and LTE Uu support and enhancement for advanced V2X use cases: R1-1812212[R]. 2018.
- [15] Evaluation of Uu for advanced V2X use cases: R1-1812621[R]. 2018.



张欣然 (1992—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为车联网和 5G 系统级仿真。

[作者简介]



王君 (1993—), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为无线通信。



温晓然 (1995—), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为无线通信。



纪晓东 (1964—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授, 主要研究方向为无线网络技术、移动 IP 技术。



佟佳俊 (1996—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为无线通信。