

用于云控制智能网联车辆安全和舒适性评估的通信时延感知联合仿真平台

Yongqi Zhao, Xinrui Zhang, Tomislav Mihalj, Martin Schabauer, Luis Putzer, Erik Reichmann-Blaga, Ádám Boronyák, András Rövid, Gábor Soós, Peizhi Zhang, Lu Xiong, Jia Hu *Senior Member, IEEE*, and Arno Eichberger *Member, IEEE*

Abstract—测试云控智能网联车辆 (ICV) 需要能够真实模拟车辆行为和真实通信延迟的仿真环境。本文提出了一个延迟感知的联合仿真平台, 集成了 CarMaker 和 Vissim, 以便在真实的车云 (V2C) 延迟条件下评估安全性和舒适性。该平台引入了两种通信延迟模型, 这些模型来自于中国和匈牙利的 5G 实证测量, 并使用 Gamma 分布进行统计建模。提出了一个主动冲突模块 (PCM), 用于动态控制背景车辆并生成安全关键场景。该平台通过在包括两种 PCM 模式 (启用/禁用) 和三种延迟条件 (无延迟、中国、匈牙利) 的六种测试条件下对一个示例测试系统 (SUT) 进行实验验证。安全性和舒适性通过包括碰撞率、车距、侵入后时间和纵向加速度的频谱特征等指标进行评估。结果表明, PCM 有效增加了驾驶环境的危急性, 而 V2C 延迟主要影响乘车舒适性。这些发现证实了该平台在多样化测试条件下系统评估云控 ICV 的有效性。

Index Terms—Intelligent Connected Vehicles, Co-simulation Platform, 5G, Communication Latency Modeling, Software-in-the-Loop, Simulation Testing.

I. 引言

智能网联车辆 (ICVs) 利用车联网 (V2X) 技术实现协同驾驶, 从而提高交通效率并改善整体驾驶体验 [1]。在这些技术中, 云控 ICVs 通过与云平台的实时数据交换进一步平滑交通流量 [2]。为了支持这些技术的部署, 各国推出了战略性举措, 例如美国交通部的 “Saving Lives with Connectivity” 计划 [3]。然而, 大规模部署 ICVs 需要严格的测试以确保其安全性和可靠性。

This work has been submitted to the IEEE for possible publication. Copyright may be transferred without notice, after which this version may no longer be accessible. (Corresponding author: Xinrui Zhang)

Yongqi Zhao is with the School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China and the Institute of Automotive Engineering, Graz University of Technology, Graz 8010, Austria (e-mail: yongqi.zhao@tugraz.at)

Xinrui Zhang, Peizhi Zhang, and Lu Xiong are with the School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China (e-mail: zhangxr@tongji.edu.cn; zhangpeizhitom@126.com; xiong_lu@tongji.edu.cn).

Tomislav Mihalj, Martin Schabauer, Luis Putzer, Erik Reichmann-Blaga, and Arno Eichberger are with the Institute of Automotive Engineering, Graz University of Technology, Graz 8010, Austria (e-mail: tomlav.mihalj@tugraz.at; martin.schabauer@tugraz.at; putzer@alumni.tugraz.at; e.reichmannblaga@gmail.com; arno.eichberger@tugraz.at).

Ádám Boronyák and András Rövid are with Department of Automotive Technologies, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 1111, Hungary (e-mail: boronyak.adam@kjk.bme.hu; rovid.andras@kjk.bme.hu).

Gábor Soós is with Magyar Telekom Nyrt., Budapest, 1097, Hungary (e-mail: soos.gabor2@telekom.hu).

Jia Hu is with Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China (e-mail: hujia@tongji.edu.cn).

目前, 测试 ICV 的主要方法有三种, 即道路测试、封闭轨道测试和仿真测试 [4]。尽管道路测试具有现实性, 但由于现实世界场景的随机性和不可控性, 其效率较低, 需要行驶数十亿英里才能充分验证 ICV 的安全性和可靠性 [5]。封闭轨道测试虽然高效且逼真, 但需要对专用设施进行大量投资; 例如, 匈牙利的 ZalaZONE 设施建设费用为 1.59 亿美元 [6]。仿真测试结合了效率、成本效益和 (接近现实时的) 逼真性, 已成为 ICV 开发中的关键环节, 其在推动 Waymo 技术进步中发挥了重要作用 [7]。然而, ICV 的 V2X 通信的快速发展对仿真测试提出了不断变化的挑战。

智能网联车辆的测试范围已经从关注单个车辆扩展到涵盖车辆-网络-云系统, 其中的控制通过云平台进行管理。云控制涉及利用来自路侧基础设施和智能网联车辆的环境感知和定位数据在云中进行运动规划和控制, 并通过网络传输控制信号 [2]。这种架构需要模拟测试, 结合车辆动力学、驾驶环境和网络通信延迟。

近年来, 自动驾驶模拟器的开发主要集中在单一的特定方面, 如交通流、传感数据、驾驶策略或车辆动力学, 往往缺乏 V2X 功能 [8]。例如, Vissim 可以模拟真实的交通流, 但缺乏车辆动力学, 而像 CarMaker 这样的车辆动力学模拟器提供详细的车辆动力学但无法模拟交通流。为了应对这些局限性并整合 V2X 通信, 提出了多种软件组合方案, 例如将 NS-3 与 Vissim [9], [10] 或 CarMaker [11] 结合, 和将 OMNeT++¹ 与 SUMO [12] 或 CARLA [13] 结合。然而, 这些解决方案专注于协同控制系统, 强调 V2X 对交通效率的改进。由于现实世界测量数据的稀缺, 通信延迟经常以简化的方式处理。

除了软件之外, 硬件组件也已集成到仿真平台中以提高真实度。真实测试车辆 [14], [15] 和驾驶模拟器 [16] 模拟车辆动力学, 而增强现实、交通模拟器和真实交通则用于建模背景车辆 [14]–[17]。Cohda 无线设备和 V2X 信号发生器已被用来建立 V2X 通信 [14], [16], [18], [19]。

总之, 现有仿真平台存在三个明显的局限性。首先, 车辆动力学和交通流通常是分别处理的, 很少有平台将两者整合, 并且常常缺乏 V2X 仿真, 这使得 ICV 的测试变得不可行。其次, 缺乏真实世界通信延迟数据限制了对其影响的研究。第三, 测试效率有限, 因为自车通常处于低关键驾驶环境中, 减少了与挑战性场景的互动。

为了解决这些已识别的限制, 我们开发了一个协同仿真平台, 其贡献如下:

- 1) 通过整合 CarMaker 和 Vissim, 实现了车动态、交通流和车与云 (V2C) 通信的模拟。

¹<https://omnetpp.org/>

- 2) 车辆动态模型和交通流是基于真实测量构建的, 同时, 基于在中国和匈牙利收集的数据实现了两种 V2C 通信延迟模型, 以表示不同用例的实际通信延迟。
- 3) 通过统计拟合测量数据, 将 V2C 通信延迟分布与测试数据相匹配, 并通过分析推导进一步验证其服从 Gamma 分布。
- 4) 背景车辆 (BGVs) 经过战略性的控制, 以确保更高地暴露于关键驾驶场景, 从而提高测试效率。
- 5) 系统地研究和分析了 V2C 通信延迟变化对 ICVs 的影响。

本文描述了一种工具, 用于模拟具有现实通信延迟的关键驾驶场景, 帮助开发强大的 ICVs 算法。在不同的延迟条件下, 还促进了安全性和舒适性性能的实现。

II. 相关工作

自 20 世纪 90 年代以来, 为自动驾驶系统 (ADS) 开发和验证量身定制的仿真平台越来越重要。这些平台通过减少大量的道路测试需求和加快验证过程提供了显著的优势。在过去的三十年中, 已经开发了众多模拟器用于各种目的, 包括交通控制设计、传感器数据处理、驾驶政策制定、车辆动态优化和车辆控制。然而, 这些模拟器通常是专业化的, 往往只关注单一方面, 如车辆动态或交通流量, 而没有提供集成解决方案。此外, 对 V2X 通信仿真的贡献相对有限。 [8]

为了应对这些限制, 已经提出了联合仿真框架, 这些框架整合了多种工具以进行更全面的仿真。大多数框架将主流仿真器 (例如 Vissim、SUMO、CARLA 或 CarMaker) 与第三方软件结合, 以解决特定的缺口。例如, Vissim 能够有效地模拟交通流, 但缺乏 V2X 功能, 因此被与 MATLAB 集成以进行车队控制, 并与 NS-3 集成以处理通信约束 [9], [10]。类似地, SUMO 与 TraaS [20] 和 OMNeT ++ [12] 结合以实现 V2X 仿真。CARLA 通过 Python API 扩展 [21], [22], OMNeT ++ [13], 以及 Artery V2X [23] 得到扩展以实现 V2X 功能。其他显著的尝试包括 OpenCDA, 它将 CARLA 与 SUMO [24] 集成, 以及将 NS-3 和 CarMaker 结合以进行 V2X 仿真 [11]。Nalic 等 [25] 开发了一个联合仿真框架来生成关键场景, 但不支持 V2X 功能。此外, 还使用 Gazebo 来构建兼容 V2X 的仿真平台 [26], 并且 [27] 最近引入了一种用于卡车编队管理的仿真平台。

除了只用软件进行仿真之外, 还集成了车辆在环 (ViL) 方法以增强仿真真实感。Eichberger 等 [14] 使用配备 Cohda MK4 设备的车辆来收集 V2X 通信数据并开发传感器模型, 而 Peters 等 [17] 使用 Cohda MK6² 设备建立了 C-V2X 平台。Lei 等 [18] 设计了一种在真实车辆和 CMW 500³ 信号发生器的环境中进行的测试方案, 用于 V2X 评估。Feng 等 [15] 将真实车辆与增强现实结合在 ViL 设置中, 虽然没有 V2X 功能。

硬件在环 (HiL) 方法将真实硬件集成到仿真框架中, 为系统测试和验证提供了逼真的环境。Lee 等人 [16] 基于 dSPACE 和 Cohda MK5 开发了一种 HiL 仿真器, 用于评估合作节能驾驶系统。Mafakheri 等人 [28] 通过 SUMO 和

路侧单元实现了实时 HiL 仿真, 以研究测试车辆与模拟对象之间的交互。Wang 等人 [19] 介绍了一个结合了 VTD 和 RF 发生器的实验室框架用于 V2X 评估, 而 Gemmi 等人 [29] 使用 SUMO 与 Colosseum 网络模拟器 (参见 [30]) 来模拟合作、互联和自动化的移动场景。

总之, 所审查的仿真平台由于其在整合车辆动力学、交通流、考虑延迟的 V2C 通信模型以及有效暴露于关键驾驶场景方面的局限性, 无法完全支持 ICV 测试。为克服这些缺点, 当前工作中提出了一种结合 CarMaker、Vissim 和 V2C 通信延迟测量的仿真平台。

III. 方法论

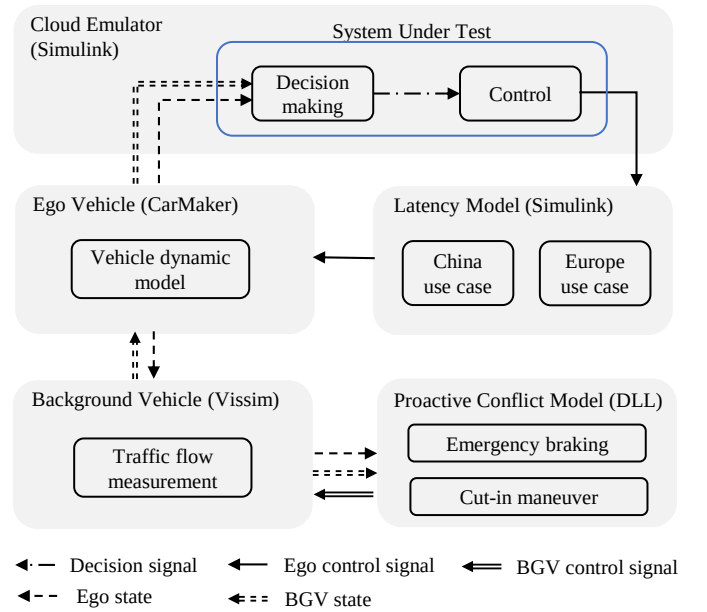


Figure 1. 所提出的联合仿真平台的架构。

Figure 1 展示了所提出的协同仿真平台的架构。该平台将被测系统 (SUT) 集成在 Simulink 环境中的云模拟器中 (参见第 III-A 节), 并与 Vissim 中建模的交通环境相结合, 在其中可以动态控制 BGV (参见第 ?? 节)。通过驾驶员模型动态链接库 (DLL) 实现的前瞻性冲突模型 (PCM), 能够在 Vissim 中操控 BGV 以生成关键测试场景 (参见第 III-C 节)。自车在 CarMaker 中通过详细的车辆动力学模型进行仿真 (参见第 III-B 节)。此外, 通过将真实世界 5G 测量的经验拟合和分析推导相结合, 形成了一个 V2C 通信时延模型, 以模拟现实的通信延迟 (参见第 ?? 节)。

A. 云模拟器

云环境在 Simulink 中仿真, 作为 SUT 的部署平台, 如 Figure 1 所示。SUT 代表一个 2 级 ADS, 根据 SAE 分类学 [31] 分类。BGV 的检测是通过安装在自车上的理想传感器执行的。术语 “ideal sensor” 指的是获取地面实况数据, 例如位置和速度, 而不是传感器的原始输出。检测到的 BGV 和自车的状态实时传输到云端。随后, 控制信号从云端传递到自车, 结合了通信延迟的影响。

²<https://www.cohdawireless.com/solutions/mk6/>

³https://www.rohde-schwarz.com/nl/products/test-and-measurement/wireless-tester-network-emulator/rs-cmw500-wideband-radio-communication-tester_63493-10844.html

B. 自车

建立了一种三维非线性车辆模型，该模型基于一辆作为测试车辆的 BMW 640i Gran Coupe (2011)，并在 IPG CarMaker 中构建。首先，通过实验室测量、数据表以及合理的近似值（在没有测量或数据的情况下）确定了必要的模型参数和特性，见 Table I。随后，不包括在 CarMaker 模板中的主动子系统，例如主动转向，被单独在 MATLAB/Simulink 中建模并实现。最后，通过在试验场进行的实际车辆动力学测试所获得的测量数据，对车辆模型和仿真结果进行了评估和实验验证。在附录 ?? 中，总结了建立和评估车辆模型的主要内容，并简要描述了验证结果。

Table I
车辆模型的必要参数和特性。

Module	Parameters & characteristics
General	Mass
	Moments of inertia
	Center of gravity
Steering system	Steering ratio
Suspension system	Spring characteristics
	Damping characteristics
	Anti-roll bar characteristics
	Suspension kinematics
Tires	Tire force characteristics
Power train	Engine characteristics
	Transmission ratio
	Drive system inertia
	Brake system characteristics

为了在所提出的模拟平台中准确表示真实的交通密度，在 Figure 2 所示的测试路网中进行了综合的横截面测量。在高速公路上的不同位置放置了激光扫描仪和其他测量设备，采集车辆数量、速度分布和车辆分类的数据。这个数据集对于制定反映自然交通流动条件的交通模型至关重要。有关收集数据的更多详细信息可以在我们以前的工作 [25] 中找到。

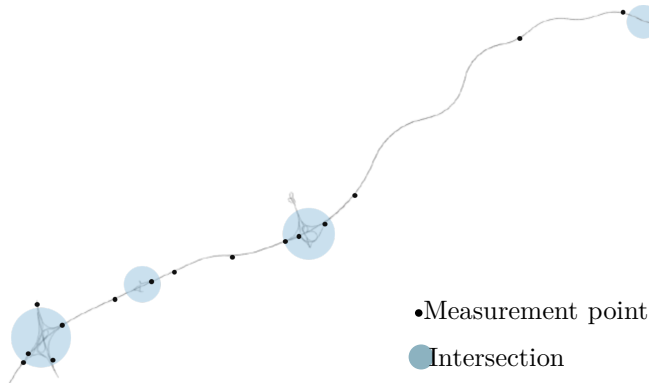


Figure 2. 测试中的道路网络概览 [25]。

C. 主动冲突模块

PCM 利用 Vissim 的驾驶员模型应用程序编程接口 (API) 通过自定义 BGV 行为创造挑战情境。通过在 C 代码中集成驾驶员模型 DLL，默认驾驶逻辑被覆盖，实现

对加速、刹车和变道的实时控制。实现了两种引发冲突的行为：前车的意外紧急刹车和相邻车辆的切入。

1) 紧急制动：一辆在自车前方同车道行驶的 BGV 被指定为前车。两车之间的距离 d 通过以下公式计算

$$d(t) = \|\mathbf{p}_{\text{lead}}(t) - \mathbf{p}_{\text{ego}}(t)\|, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{p}_{\text{lead}}(t)$ 和 $\mathbf{p}_{\text{ego}}(t)$ 分别表示在时刻 t 前车和自车的位置， $\|\cdot\|$ 表示标准欧几里得范数。当前车与自车距离低于定义的阈值 D_{brake} ，即 $d(t) < D_{\text{brake}}$ ，前车将进行突然减速以模拟紧急刹车，从而评估系统在关键跟随情景下的响应能力。

相邻车道的

2) 切入操作：BGV 通过它们与自车 d_i 的欧几里得距离进行评估，距离由以下公式给出

$$d_i(t) = \|\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_{\text{ego}}(t)\|, \quad (2)$$

，其中 $\mathbf{p}_i(t)$ 表示第 i 个 BGV 的位置。若 BGV 与自车之间的距离低于预定阈值 D_{cut} ，则认为该 BGV 具有潜在汇入的可能性，即

$$\mathcal{C} = \{i \mid d_i(t) < D_{\text{cut}}\} \quad (3)$$

，其中 $\mathcal{C}$ 代表所有此类候选 BGV 的集合， D_{cut} 是预定的空间阈值。在所有候选中，通过以下方式选择最近的 BGV

$$i^* = \arg \min_{i \in \mathcal{C}} d_i(t). \quad (4)$$

然后所选的 BGV i^* 执行变道动作进入自车车道，引发侧向侵入。此情境对 SUT 在动态变化环境中的感知和决策模块提出了挑战。

通信延迟通常使用分析模型进行模拟，尽管它们对外部工具的依赖和有限的准确性阻碍了协同模拟 [32], [33]。为了应对这一问题，使用来自中国和欧洲的真实测量数据开发了两个概率模型 [34], [35]。

3) 5G 网络架构概述：Figure 3 阐述了中国和欧洲案例中使用的 5G 网络架构。在这两种情况下，核心组件包括车载单元 (OBU)、下一代 Node B (gNB)、用户面功能 (UPF) 和应用服务器 (AS)，实现车辆到云 (V2C) 通信。欧洲的架构进一步通过路边单元 (RSUs) 整合了车到基础设施 (V2I) 链接，支持车辆与基础设施之间的协同感知。

在 Figure 3 中的延迟组件表示为 l_{V2I} , l_{radio} , l_{TN} , l_{CN} , $l_{\text{UPF-AS}}$ 和 l_{AS} ，分别代表由 V2I 通信、无线传输、传输网络、核心网络、UPF 到 AS 通信以及 AS 处理引入的延迟。V2I 链接 (l_{V2I}) 是欧洲用例特有的，并且能够实现自我车辆与 RSUs 之间的直接交互。此外，图中的箭头表示双向数据通信。

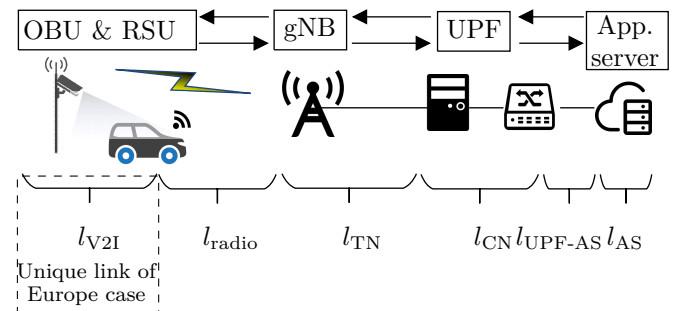


Figure 3. 中国和欧洲的常见网络架构。

4) 中国案例：

5)：V2X 解决方案概述 车辆与云端交互的过程如 Figure 4 所示。实时车辆状态数据被传输到 5G 基站 (gNB)，并通过核心网络路由到云控制中心，在那里计算出优化的轨迹，并通过相同的 5G 基础设施发送回车辆。

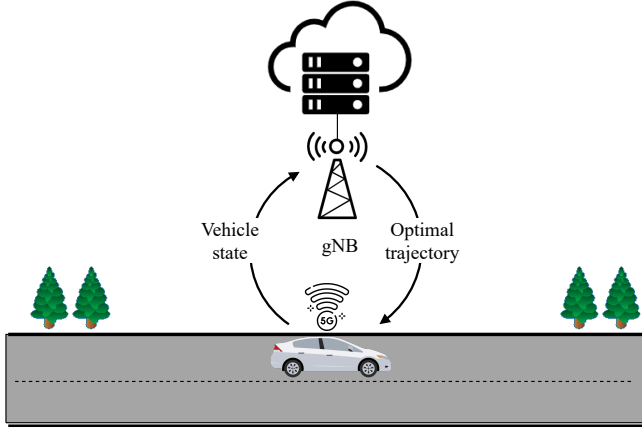


Figure 4. 中国 V2X 通信解决方案用例。

在中国上海同济大学的 ICV 测试基地进行了一次测量活动。测试在静止时进行，速度为 0 km/h，还有速度为 20 km/h 和 40 km/h 的行驶速度。为了提高数据的可靠性，每种情景至少重复十次。图 5a – 5c 展示了经验延迟分布及基于伽马、正态、中上峰和瑞利模型拟合的曲线。拟合质量通过平方和误差 (SSE) 进行评估。如 Table II 所示，伽马分布在所有测试案例中始终达到最低的 SSE，表现出优越的拟合性能。

Table II
测量和拟合的延迟分布之间的 SSE

Velocity (km/h)	SSE			
	Normal	Nakagami	Rayleigh	Gamma
0	0.0265	0.0226	0.0688	0.0185
20	0.0053	0.0047	0.0058	0.0038
40	0.0091	0.0075	0.0080	0.0066

* Bold entries indicate the distribution with the lowest SSE, indicating the best fit to the measurements.

6) 欧洲用例：如 Figure 6 所示，欧洲的 V2X 架构包含三个主要组成部分：RSU、测试车辆以及作为云计算单元运行的中央服务器 (CS)。RSU 集成了用于目标检测和跟踪的传感器和边缘计算机，并将结果转发给 CS。测试车辆向 CS 传达其位置，并接收用于轨迹调整的控制信号。CS 中的融合算法结合来自两个来源的输入，然后由轨迹规划器用来计算并返回优化的轨迹。更多的架构细节在 [36]–[38] 中提供。

7)：概率模型 测试活动在匈牙利扎拉埃格尔塞格的 ZalaZONE⁴ 试验场进行 [39]。该场景涉及一个基于云的控制系统在测试车辆接近时，响应一个穿过道路的人行横道假人。路边单元监控场景并将数据传输到云服务器，模拟云功能。然后云服务器向车辆发送控制信号，以启动避让动作。

⁴<https://zalazone.hu/en/>

欧洲用例的延迟分布基于五次测试试验，每次大约持续 120s，并涉及测试车辆与 CS 之间交换约 1200 条消息。图 5d 显示了测量的延迟分布及拟合模型，并且 Table III 总结了基于 SSE 的评价。与中国用例结果一致，Gamma 分布再次提供了最佳拟合结果。

Table III
测量值与拟合分布之间的 SSE

Model	Normal	Nakagami	Rayleigh	Gamma
SSE	0.0080	0.0063	0.0258	0.0044

* Bold entry indicates the distribution with the lowest SSE, indicating the best fit to the measurements.

为了进一步验证概率模型，基于 5G 通信网络的结构开发了一个理论延迟模型。该模型结合排队论和重传机制以解析方式表征延迟。推导出的延迟分布与 Gamma 分布一致，从而证实了经验发现。完整的推导过程详见附录 ??。

IV. 实验

在第 III 节中，介绍了构建联合仿真平台的方法，并在 Figure 7 中展示了其实现的一个片段。在本节中，进行了一次仿真实验，并分析结果以证明该平台的有效性。

A. 仿真设置

Table IV 展示了模拟测试矩阵，由六个条件组成，这些条件是由两个 PCM 配置 (有 PCM 和无 PCM) 和三个延迟概况定义的：无延迟 (NL)、中国延迟 (CL)、匈牙利延迟 (HL)。

Table IV
模拟测试矩阵

	NL	CL	HL
Without PCM	✓	✓	✓
With PCM	✓	✓	✓

*Each condition was simulated across five initial speeds (90, 100, 110, 120, 130 km/h) and three initial lane positions (left, center, right).

每个条件都在多种自车初始配置下进行评估。这些配置包括五种速度和三个车道位置，如 Table IV 所总结。一次仿真运行是指在预定义的场景持续时间内的完整运行，无论是否发生碰撞都将继续进行。

B. 安全评估

SUT 的安全性能通过三个互补指标评估：碰撞率 (CR)、车距 (DHW) 和侵入后时间 (PET)。CR 测量碰撞的频率以反映整体安全性。DHW 评估跟随情况的关键性，而 PET 则描述自车遇到的切入情况的关键性。

1) 碰撞率：

2)：度量定义 碰撞率通过所有模拟运行的累计计算得出，由

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\text{collision}}^{(i)}}{\sum_{i=1}^n D^{(i)}}, \quad (5)$$

其中 $N_{\text{collision}}^{(i)}$ 表示第 i 次模拟运行中的碰撞次数， $D^{(i)}$ 是第 i 次运行的驾驶距离 (以公里计)， n 代表总的运行次数。

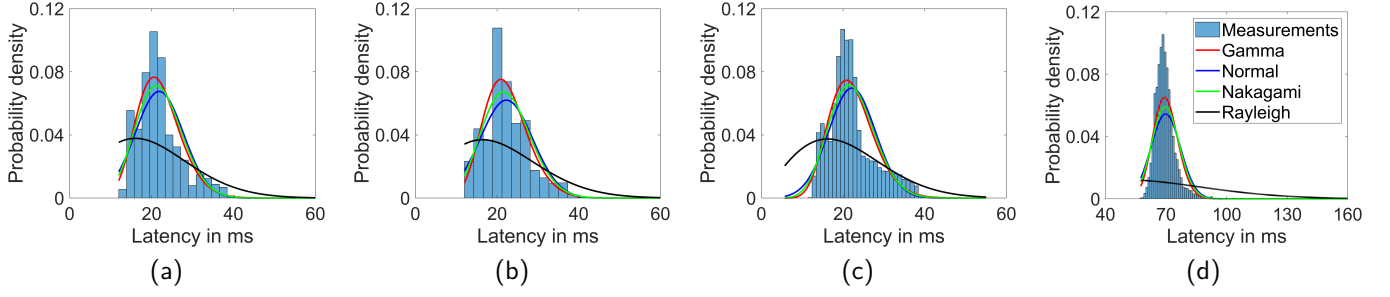


Figure 5. 中国病例的测量延迟和拟合分布分别为 0 km/h (5a), 20 km/h (5b), 40 km/h (5c), 以及欧洲病例 (5d)。

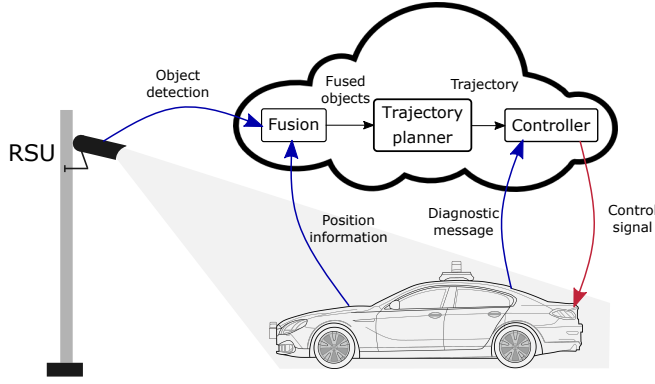


Figure 6. 欧洲用例中的 V2X 通信解决方案。

3) : 评估结果 Figure 8 展示了六种测试条件下的 CR。相比于没有激活 PCM 的测试, 在所有延迟设置下, 当 PCM 激活时观察到明显更高的 CR。这表明 PCM 有效地生成了高风险场景, 从而加速了 SUT 暴露于安全关键场景。

当禁用 PCM 时, CR 保持在低水平, 并且在延迟配置文件中没有变化。当 PCM 激活时, NL、CL 和 HL 下的 CR 是可比的。这些发现表明, 在非极端情况下, 延迟不会直接导致 ICV 的碰撞, 这与此前的工作 [40] 一致。

4) 车间距: 在以下场景中, DHW 表示每个时间步自车与前车之间的欧几里得距离, 定义为

$$DHW(t) = \|\mathbf{p}_{\text{lead}}(t) - \mathbf{p}_{\text{ego}}(t)\|, \quad (6)$$

。其中, $\mathbf{p}_{\text{lead}}(t)$ 和 $\mathbf{p}_{\text{ego}}(t)$ 分别表示时间 t 时前车和自车的位置。根据 [41], 当 DHW 降到 50 m 以下时, 认为高速公路跟随场景具有临界性。然后, 临界跟随场景 $f_{\text{crit}}^{\text{DHW}}$ 的频率计算为

$$f_{\text{crit}}^{\text{DHW}} = \frac{N_{\text{DHW} < 50}}{N_{\text{total}}}, \quad (7)$$

, 其中 $N_{\text{DHW} < 50}$ 是 DHW 低于 50 m 的时间步数, N_{total} 是模拟期间的总时间步数。

5) : 评估结果 Table V 表示在每个测试条件下关键跟随场景 $f_{\text{crit}}^{\text{DHW}}$ 的频率。在激活 PCM 时, 频率比禁用 PCM 时增加了 1.2 到 1.5 倍, 这表明 PCM 大幅度提高了跟随场景的关键性。

Table V
关键跟随场景的频率

	NL	CL	HL
Without PCM	0.199	0.205	0.199
With PCM	0.484	0.465	0.508
Increase	+143.2 %	+126.8 %	+155.3 %

* Bold values indicate the percentage increase in the frequency of critical following scenarios caused by PCM activation.

Table VI 报告了与 NL 条件相比的关键跟随情境频率的相对变化。不论是否启用 PCM, 关于延迟效果均未观察到一致性模式, 这表明延迟对导致关键跟随情境的影响有限。

Table VI
关键跟随情景频率的相对变化 (NL 与其他)

Comparison	Without PCM	With PCM
NL vs. CL	+3.0 %	-3.9 %
NL vs. HL	0.0 %	+5.0 %

* Bold values indicate the percentage increase in critical following scenario frequency, computed by comparing CL, and HL against the NL baseline.

6) 侵入后时间: 在插入情景中, PET 量化了插入车辆完成变道与自车到达同一位置之间的时间差, 具有定义的空间容忍度 δ 。PET 计算公式为

$$PET = t_{\text{ego}} - t_{\text{cut}}, \quad (8)$$

其中 t_{cut} 是插入车辆完成机动的时间, t_{ego} 是自车最早到达同一位置 (在 δ 范围内) 的时间。令 $\mathbf{p}_{\text{cut}}^*$ 为插入车辆在时间 t_{cut} 时的位置, 则

$$t_{\text{ego}} = \min \{t \geq t_{\text{cut}} \mid \|\mathbf{p}_{\text{ego}}(t) - \mathbf{p}_{\text{cut}}^*\| < \delta\}. \quad (9)$$

根据 [42], 若 PET 小于 1 s, 则插入情景被视为关键。一段时间内的关键插入情景的频率 $f_{\text{crit}}^{\text{PET}}$ 的计算公式为

$$f_{\text{crit}}^{\text{PET}} = \frac{N_{\text{PET} < 1s}}{N_{\text{cut-in}}}, \quad (10)$$

其中 $N_{\text{PET} < 1s}$ 是 PET 小于 1 s 的插入情景数量, 而 $N_{\text{cut-in}}$ 是模拟期间插入情景的总数。

Table VII 总结了在不同测试条件下关键切入场景 $f_{\text{crit}}^{\text{PET}}$ 的频率。当 PCM 激活时, 观察到显著增加, 这表明 PCM 有效地在高速公路上生成高风险的切入场景。

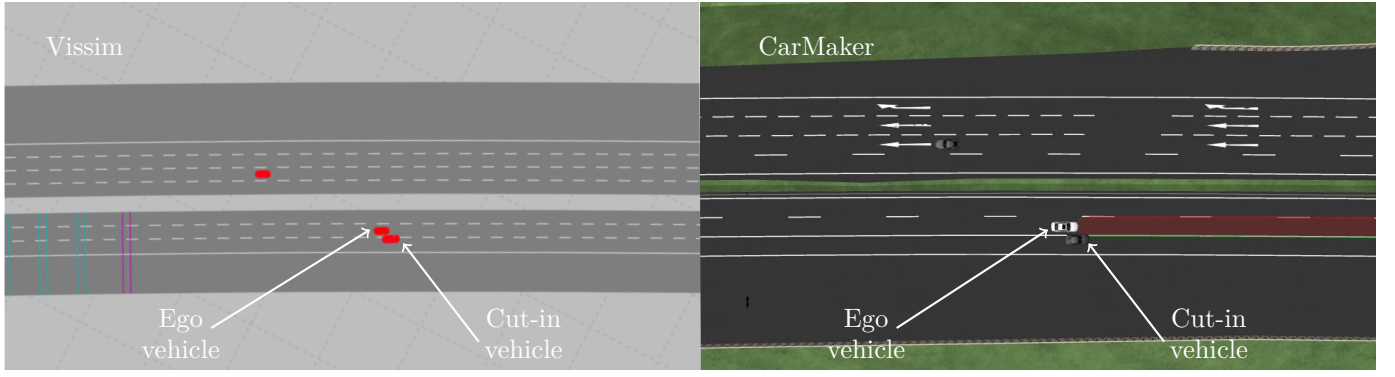


Figure 7. 在协同仿真平台中的一个加塞场景片段，其中加塞车辆由 PCM 控制。左图显示了 Vissim 中的仿真，右图展示了 CarMaker 中的仿真。

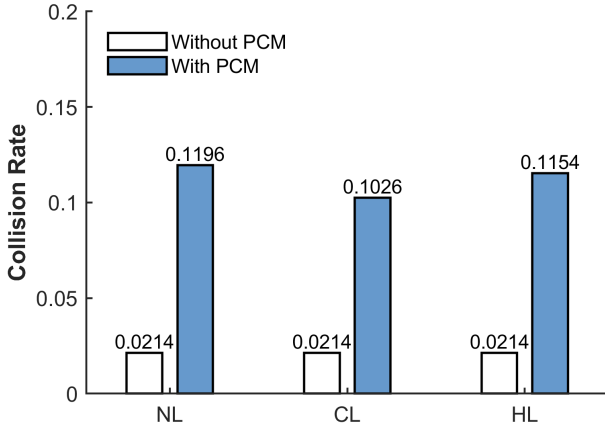


Figure 8. 模拟测试的碰撞率。

Table VII
关键插入场景的频率

	NL	CL	HL
Without PCM	0.132	0.143	0.132
With PCM	0.343	0.312	0.320
Increase	+159.8 %	+118.2 %	+142.4 %

* Bold values indicate the percentage increase in the frequency of critical cut-in scenarios caused by PCM activation.

Table VIII 报告了关键切入场景频率的相对变化。结果表明，无论 PCM 激活与否，CL 和 HL 在增强切入场景关键性方面表现出不一致的效果。这表明，通过增强切入场景的关键性，无法证实延迟对 ICV 安全性能的影响。

Table VIII
关键切入场景频率的相对变化 (NL 与其他)

Comparison	Without PCM	With PCM
NL vs. CL	+8.3 %	-9.0 %
NL vs. HL	0.0 %	-6.7 %

* Bold values indicate the percentage increase in critical cut-in scenario frequency, computed by comparing CL and HL against the NL baseline.

C. 舒适度评估

舒适度指标被定义为国际标准化组织 (ISO) 2631 所定义的敏感频带 (0.5–10Hz) 内纵向加速度总能量，获得方式是对绝对加速度信号进行离散傅里叶变换 (DFT)。功率谱密度 $P(f)$ 通过以下公式计算

$$P(f) = \frac{|\mathcal{F}(a(t))|^2}{N}, \quad (11)$$

，其中 $a(t)$ 是绝对纵向加速度， $\mathcal{F}(a(t))$ 是其傅里叶变换， N 是样本数量。然后通过 $f \in [0.5, 10]$ 到 赫兹的范围内对 $P(f)$ 求和来计算敏感频带 E_{sens} 中的总功率

$$E_{\text{sens}} = \sum_{f=0.5 \text{ Hz}}^{10 \text{ Hz}} P(f). \quad (12)$$

1) 评估结果：Table IX 表示在所有测试条件下敏感频率内的总功率。结果表明，与无 PCM 情况相比，PCM 激活导致功率显著增加。这表明 PCM 显著降低了乘坐舒适性。

Table IX
敏感频率内的总功率 ((/ 2)²)

	NL	CL	HL
Without PCM	6566.51	6796.71	7827.16
With PCM	20522.47	21412.07	24380.87
Increase	+212.6 %	+214.9 %	+211.4 %

* Bold values indicate the percentage increase in total power in sensitive frequency caused by PCM activation.

Table X 表示敏感频率范围内总功率的相对变化。结果表明，在 PCM 开启和关闭条件下，延迟在不同程度上增加了这种功率。这些发现表明，延迟倾向于通过在敏感频率范围内放大纵向加速度来降低乘坐舒适性。

Table X
敏感频率总功率的相对变化 (NL 与其他)

Comparison	Without PCM	With PCM
NL vs. CL	+3.5 %	+4.3 %
NL vs. HL	+19.2 %	+18.8 %

* Bold values indicate the percentage increase in total power within sensitive frequency, computed by comparing CL and HL against the NL baseline.

总之，通过实验获得了以下结论和发现：

- 1) 所提出的联合仿真平台通过使用 PCM，有效地增加了被测系统 (SUT) 在安全关键场景中的曝光度，特别是通过生成更频繁的碰撞 (多达五倍)，并将跟随和插入场景的关键性提高 1.2 到 1.5 倍。这展示了该平台在加速安全验证方面的能力。
- 2) V2C 通信延迟对 ICV 的安全性能没有显著影响。它既不会增加碰撞率，也不会加剧跟车或切入场景的严重性。然而，它通过在敏感频率范围内放大纵向加速度，一贯地降低了乘坐舒适性，导致功率增加最多可达 20 %。这一发现与在 [40] 中报告的结果一致。

V. 结论

本研究介绍了一个联合仿真平台，该平台结合了详细的车辆动力学模型、基于现实测量的真实交通环境、战略性的 BGV 控制和用于评估 ICV 的 V2C 延迟模型。通过在六种条件下测试一个示例性 SUT (结合 PCM 激活和三种延迟设置)，证明了该平台的有效性。仿真结果表明，该平台可以生成高风险的驾驶环境，导致碰撞增加约五倍，随后的安全关键跟随和加塞场景增加 1.2 到 1.5 倍。此外，结果表明 V2C 通信延迟对 ICV 的舒适性有主要影响，而不是对安全性能，这与 [40] 中报道的结果一致。

该平台的一个实际限制是，当激活 PCM 以控制 BGV 时，模拟速度较慢，因为频繁的数据交换会引入延迟。改进通信接口或并行运行控制器可以加快模拟速度。

在未来的研究中，将会结合由 [43] 开发的工具生成，并采用 OpenSCENARIO 格式化的关键场景，以实现基于场景的测试。此外，还将结合车与基础设施 (V2I) 协同感知，以解决感知限制和信息孤岛问题。

所需的模型参数和特征在 Table I 中概述。下面总结了识别过程的主要主题。

CarMaker 的可调多体框架用于考虑测试车辆的主动控制子系统，特别是主动防侧倾杆以及前后轮转向系统。这些系统根据闭合轨道车辆动力学测量的数据在 MATLAB/Simulink 中建模，并作为功能示例单元 (FMUs) 实现在 CarMaker 中。轮胎力传递通过 Pacejka 的魔法公式轮胎模型进行建模，该模型在 CarMaker 中直接可用。对于其余的子系统特征，如制动系统和悬架运动学，则使用了 CarMaker 的通用模板。

通过车辆动力学测量数据对车辆模型的性能以及模拟结果的合理性进行评估和验证。测试在封闭轨道试验场上进行，包括在 90m 圆形轨道上的稳态转向，55 km/h 和 80 km/h 的正弦转向操作以及不同的加速和制动操作，详见 [44]。测量数据使用 Genesys ADMA⁵ 设备收集，该设备记录速度、加速度、位置和姿态角。此外，还通过测量方向盘角度的方向盘进行测量。随后，通过使用测量的转向角和车辆速度作为模型的输入，来比较测量结果和模拟结果，以复制封闭跑道测试。在 ?? 中，列出了测量和模拟结果之间相关量的计算均方根误差 (RMSEs)，例如纵向速度 v_x 、偏航率 ω_z 、横滚角 ϕ 以及分别的纵向和横向加速度 a_x 和 a_y 。尽管偏航率在尤其是正弦转向期间有较大的偏差，并建议进行进一步验证，总体结果表明车辆模型对于目前工作的研究是有效的。

理论延迟模型被推导出并验证了与 Figure 3 中描绘的实际通信延迟相符。端到端 (E2E) 5G 通信延迟 l_{E2E} 包

括无线接入网 (RAN) l_{radio} 、传输网络 (TN) l_{TN} 、核心网络 (CN) 延迟 l_{CN} ，CN 的 UPF 节点与 AS 之间的延迟 $l_{\text{UPF-AS}}$ ，以及 AS 处理延迟 l_{AS} 。这可以表示为

$$l_{E2E} = l_{\text{radio}} + l_{\text{TN}} + l_{\text{CN}} + l_{\text{UPF-AS}} + l_{\text{AS}}. \quad (13)$$

这些组件中的每一个都包括上行链路和下行链路的延迟。在实践中，除了考虑 RAN 中的重传外，其他节点的延迟可以简化为排队延迟和传输延迟 [45] 的总和。因此，排队理论被用于详细的 RAN 建模，而其他节点的延迟则是类似的。RAN 延迟可以形式化为在

$$l_{\text{radio}} = \tau_{\text{radio}} + \tau_{\text{HARQ}} + N(\tau'_{\text{radio}} + \tau_{\text{HARQ}}), \quad (14)$$

中使用 $N = 0, 1, \dots, N_{\text{max}}$ ，并且其中 τ_{radio} 和 τ'_{radio} 分别是车载设备与 gNB 之间的传输和重传延迟。由混合自动重传请求 (HARQ) 重传机制引起的延迟由 τ_{HARQ} 表示， N 表示重传次数。根据互联网协议 (IP) 层数据调度机制，Equation 14 可以重新定义为

$$l_{\text{radio}} = \tau_{\text{sch}} + \tau_{\text{data}} + \tau_{\text{HARQ}} + N(\tau'_{\text{sch}} + \tau_{\text{data}} + \tau_{\text{HARQ}}), \quad (15)$$

，其中 τ_{sch} 表示资源调度延迟， τ_{data} 表示数据传输延迟， τ_{HARQ} 可视为一个固定延迟 C [46]。根据 [45]，传输过程被建模为一个 M/M/1 排队。资源调度延迟被视为排队时间，而数据传输延迟被视为服务时间。假设数据到达遵循参数为 λ_1 的泊松分布，服务时间遵循参数为 λ_2 的指数分布，表示 $\tau_{\text{tx}} = \tau_{\text{sch}} + \tau_{\text{data}} + C$ 表示处理和传输延迟，而数据包的到达可表示为一个泊松过程

$$\begin{aligned} P(N = n | \tau_{\text{tx}} = t) &= \frac{P(N = n) P(\tau_{\text{tx}} | N = n)}{P(\tau_{\text{tx}} = t)} \\ &= \frac{1}{P(\tau_{\text{tx}} = t)} P_n \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (\lambda_2 t)^{n-1}}{n!} \\ &= \frac{(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (\lambda_1 t)^n}{P(\tau_{\text{tx}} = t) n!}. \end{aligned} \quad (16)$$

根据随机过程理论中的泊松过程理论，泊松分布事件之间的到达时间间隔遵循指数分布。因此，传输延迟的概率可以表示为根据 ??，传输延迟的分布遵循参数为 $\mu_1 = \lambda_2 - \lambda_1$ 的指数分布。对于重传过程，假设重传成功概率为 p ，第一次 $n - 1$ 次传输失败并且 n^{th} 传输成功的概率可以表示为 $P(N = n) = (1 - p)^{n-1} p$ 。重传次数遵循几何分布 $N \sim \text{GE}(p)$ ，其中 p 依赖于块错误率 (BLER)。因此，重传时间 τ_{rtx} 遵循速率参数为 μ_2 的指数分布。考虑到 BLER 通常较小，重点在于重传次数为 1 的情况。因此，Equation 15 可以简化为基于上述推导，随机变量 l_{radio} 可以被视为两个独立随机变量 τ_{tx} 和 τ_{rtx_1} 的和，这两个随机变量都遵循指数分布。因此，其概率密度函数可以表示为一般情况下，无损地假设重传延迟大致等于第一次传输的延迟。可以建立关系 $\tau_{\text{tx}} \sim \text{Exp}(\mu_1)$ ， $\tau_{\text{rtx}_1} \sim \text{Exp}(\mu_2)$ ， $\mu = \mu_1 = \mu_2$ 。?? 可以重写为这相当于 $l_{\text{radio}} \sim \text{Gamma}(2, \mu)$ 的概率分布。因此，5G E2E 的通信延迟统计模型理论上遵循伽马分布。

REFERENCES

- [1] SAE, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Cooperative Driving Automation for On-Road Motor Vehicles*, Std., 2021, issued by the Cooperative Driving Automation (CDA) Committee, Last accessed: October 24, 2024.

⁵<https://genesys-offenburg.de/adma-g/>

- [2] W. Chu, Q. Wuniri, X. Du, Q. Xiong, T. Huang, and K. Li, "Cloud control system architectures, technologies and applications on intelligent and connected vehicles: a review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 34, no. 1, p. 139, 2021.
- [3] USDOT, "Saving lives with connectivity: A plan to accelerate v2x deployment," https://www.its.dot.gov/research_areas/emerging_tech/pdf/Accelerate_V2X_Deployment_final.pdf, 2024, u.S. Department of Transportation, Office of the Assistant Secretary for Research and Technology, Last accessed: October 24, 2024.
- [4] E. Thorn, S. Kimmel, and M. Chaka, "A framework for automated driving system testable cases and scenarios," National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, Report DOT HS 812 623, September 2018, report No. DOT HS 812 623.
- [5] N. Kalra and S. M. Paddock, "Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?" *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 182–193, 2016.
- [6] D. Arminas, "Zalazone test track gears up," 2020, accessed: 2024-07-29. [Online]. Available: <https://www.worldhighways.com/news/zalazone-test-track-gears>
- [7] V. G. Cerf, "A comprehensive self-driving car test," *Commun. ACM*, vol. 61, no. 2, p. 7, jan 2018.
- [8] Y. Li, W. Yuan, S. Zhang, W. Yan, Q. Shen, C. Wang, and M. Yang, "Choose your simulator wisely: A review on open-source simulators for autonomous driving," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, pp. 1–19, 2024.
- [9] A. Choudhury, T. Maszczyk, M. T. Asif, N. Mitrovic, C. B. Math, H. Li, and J. Dauwels, "An integrated v2x simulator with applications in vehicle platooning," in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, pp. 1017–1022.
- [10] A. Choudhury, T. Maszczyk, C. B. Math, H. Li, and J. Dauwels, "An integrated simulation environment for testing v2x protocols and applications," *Procedia Computer Science*, vol. 80, pp. 2042–2052, 2016.
- [11] H. Hu, R. Chai, M. Chen, and X. Yang, "System-level simulation platform of c-v2x mode 4: Integrating carmaker and ns-3," in *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2021, pp. 1457–1462.
- [12] D. Jia, J. Sun, A. Sharma, Z. Zheng, and B. Liu, "Integrated simulation platform for conventional, connected and automated driving: A design from cyber-physical systems perspective," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 124, p. 102984, 2021.
- [13] T. Harges, I. Turcanu, and C. Sommer, "Poster: A case for heterogenous co-simulation of cooperative and autonomous driving," in *2023 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2023, pp. 151–152.
- [14] A. Eichberger, G. Markovic, Z. Magosi, B. Rogic, C. Lex, and S. Samiee, "A car2x sensor model for virtual development of automated driving," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, no. 5, p. 1729881417725625, 2017.
- [15] S. Feng, Y. Feng, X. Yan, S. Shen, S. Xu, and H. X. Liu, "Safety assessment of highly automated driving systems in test tracks: A new framework," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 144, p. 105664, 2020.
- [16] G. Lee, S. Ha, and J.-i. Jung, "Integrating driving hardware-in-the-loop simulator with large-scale vanet simulator for evaluation of cooperative eco-driving system," *Electronics*, vol. 9, no. 10, 2020.
- [17] S. Peters, F. Sivrikaya, and X.-T. Dang, "Sep4cam - a simulative / emulative platform for c-v2x application development in cross-border and cross-domain environments," in *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2021, pp. 1–4.
- [18] J. Lei, S. Chen, L. Zeng, F. Liu, K. Zhu, and J. Liu, "In-chamber v2x oriented test scheme for connected vehicles," in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2019, pp. 1–6.
- [19] J. Wang and Y. Zhu, "A hardware-in-the-loop v2x simulation framework: Cartest," *Sensors*, vol. 22, no. 13, 2022.
- [20] C. Olaverri-Monreal, J. Errea-Moreno, A. Díaz-Álvarez, C. Biurrun-Quel, L. Serrano-Arriazu, and M. Kuba, "Connection of the sumo microscopic traffic simulator and the unity 3d game engine to evaluate v2x communication-based systems," *Sensors*, vol. 18, no. 12, 2018.
- [21] T.-K. Lee, T.-W. Wang, W.-X. Wu, Y.-C. Kuo, S.-H. Huang, G.-S. Wang, C.-Y. Lin, J.-J. Chen, and Y.-C. Tseng, "Building a v2x simulation framework for future autonomous driving," in *2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, 2019, pp. 1–6.
- [22] B. Senkus and M. Soyuturk, "Multi-user real-time controllable connected cars testing platform," in *2023 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*, 2023, pp. 1–6.
- [23] M. Jooriah, D. Datsenko, J. Almeida, A. Sousa, J. Silva, and J. Ferreira, "A co-simulation platform for v2x-based cooperative driving automation systems," in *2024 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2024, pp. 227–230.
- [24] R. Xu, Y. Guo, X. Han, X. Xia, H. Xiang, and J. Ma, "Opencca: An open cooperative driving automation framework integrated with co-simulation," in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, pp. 1155–1162.
- [25] D. Nalic, A. Eichberger, G. Hanzl, M. Fellendorf, and B. Rogic, "Development of a co-simulation framework for systematic generation of scenarios for testing and validation of automated driving systems," in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019, pp. 1895–1901.
- [26] E. Zhang and N. Masoud, "V2xsim: A v2x simulator for connected and automated vehicle environment simulation," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, pp. 1–6.
- [27] J. Hu, X. Yan, G. Wang, M. Tu, X. Zhang, H. Wang, D. Gruyer, and J. Lai, "A simulation platform for truck platooning evaluation in an interactive traffic environment," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–20, 2024.
- [28] B. Mafakheri, P. Gonnella, A. Bazzi, B. M. Masini, M. Caggiano, and R. Verdona, "Optimizations for hardware-in-the-loop-based v2x validation platforms," in *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, 2021, pp. 1–7.
- [29] G. Gemmi, P. Johari, P. Casari, M. Polese, T. Melodia, and M. Segata, "Colossumo: Evaluating cooperative driving applications with colosseum," 2024.
- [30] L. Bonati, P. Johari, M. Polese, S. D' Oro, S. Mohanti, M. Tehrani-Moayyed, D. Villa, S. Shrivastava, C. Tassie, K. Yoder, A. Bagga, P. Patel, V. Petkov, M. Seltser, F. Restuccia, A. Gosain, K. R. Chowdhury, S. Basagni, and T. Melodia, "Colosseum: Large-scale wireless experimentation through hardware-in-the-loop network emulation," in *2021 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2021, pp. 105–113.
- [31] SAE J3016, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicles*, Std. SAE J3016, 2018, last accessed: October 24, 2024.
- [32] M. C. Lucas-Estañ, B. Coll-Perales, T. Shimizu, J. Gozalvez, T. Higuchi, S. Avedisov, O. Altintas, and M. Sepulcre, "An analytical latency model and evaluation of the capacity of 5g nr to support v2x services using v2n2v communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 2, 2023.
- [33] B. Coll-Perales, M. C. Lucas-Estañ, T. Shimizu, J. Gozalvez, T. Higuchi, S. Avedisov, O. Altintas, and M. Sepulcre, "End-to-end v2x latency modeling and analysis in 5g networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 5094–5109, 2023.
- [34] D. Ficzer, G. Soos, and P. Varga, "A compact 5g non-public network," in *2021 17th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*. IEEE, 2021, pp. 518–520.
- [35] D. Ficzer, G. Soós, P. Varga, and Z. Szalay, "Real-life v2x measurement results for 5g nsa performance on a high-speed motorway," in *2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, 2021, pp. 836–841.
- [36] J. Reckenzaun, R. Rott, M. Kirchengast, D. J. Ritter, P. Innerwinkler, S. Solmaz, C. Pilz, M. Schratter, A. Eichberger, T. Mihalj *et al.*, "Transnational testing, operation and certification of automated driving systems: Perspective from testpots and central system eureka projects-mid-term results," in *2023 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*. IEEE, 2023, pp. 1–8.

- [37] V. Tihanyi, A. Rövid, V. Remeli, Z. Vincze, M. Csonthó, Z. Pethő, M. Szalai, B. Varga, A. Khalil, and Z. Szalay, "Towards cooperative perception services for its: Digital twin in the automotive edge cloud," *Energies*, vol. 14, no. 18, p. 5930, 2021.
- [38] V. Tihanyi, T. Tettamanti, M. Csonthó, A. Eichberger, D. Ficzer, K. Gangel, L. B. Hörmann, M. A. Klaffenböck, C. Knauder, P. Luley *et al.*, "Motorway measurement campaign to support r&d activities in the field of automated driving technologies," *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 2169, 2021.
- [39] A. Rovid, V. Tihanyi, M. Cserni, M. Csontho, A. Domina, V. Remeli, Z. Vincze, M. Szanto, M. Szalai, S. Nagy *et al.*, "Digital twin and cloud based remote control of vehicles," in *2024 IEEE International Conference on Mobility, Operations, Services and Technologies (MOST)*. IEEE, 2024, pp. 154–167.
- [40] X. Zhang, L. Xiong, P. Zhang, B. Leng, and Y. Che, "Cloud control with communication delay prediction for intelligent connected vehicles," in *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2024, pp. 539–544.
- [41] P. Junietz, F. Bonakdar, and B. Klamann, "PEGASUS Bericht: Kritikalitätsmetriken," Institute of Automotive Engineering (FZD), Darmstadt, Technical Report, 2018.
- [42] A. Várhelyi, "Drivers' speed behaviour at a zebra crossing: a case study," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 30, no. 6, pp. 731–743, 1998.
- [43] Y. Zhao, W. Xiao, T. Mihalj, J. Hu, and A. Eichberger, "Chat2scenario: Scenario extraction from dataset through utilization of large language model," in *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2024, pp. 559–566.
- [44] E. Reichmann-Blaga, "Validierung von fahzeugdynamischen simulationsmodellen anhand von fahzeugmessungen," Master's thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2024.
- [45] B. Coll-Perales, M. C. Lucas-Estañ, T. Shimizu, J. Gozalvez, T. Higuchi, S. Avedisov, O. Altintas, and M. Sepulcre, "End-to-end v2x latency modeling and analysis in 5g networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 5094–5109, 2022.
- [46] M. Skocaj, F. Conserva, N. S. Grande, A. Orsi, D. Micheli, G. Ghinamo, S. Bizzarri, and R. Verdone, "Data-driven predictive latency for 5g: A theoretical and experimental analysis using network measurements," in *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2023, pp. 1–6.