面向网联自动驾驶汽车的非正交多址接入实验研究

Eray G¨uven、Caner G¨oztepe、MEHMET AKIF DURMAZ、*IEEE* 会员，Semiha Tedik Bas¸aran、*IEEE* 会员，G¨unes¸ Karabulut Kurt、*IEEE* 高级会员，以及 O˘guz Kucur

arXiv:2304.01057v1 [eess.SP] 3 Apr 2023

摘要—网联自动驾驶汽车（CAV）是面向未来的交通管理中的一项重要应用。以完全自动驾驶车辆为主的车载系统需要稳健、高效的车联网（V2X）基础设施，为大量设备提供覆盖远近距离车辆的可靠连接，因此需要较高的频谱效率（SE）。功率域非正交多址接入（PD-NOMA）技术有望实现所需的高频谱效率。本文使用软件定义无线电（SDR）节点搭建了车载PD-NOMA 测试平台，并重点介绍了实施过程中遇到的主要问题及相应解决方案。本文测量了不同信道条件下车辆在移动和静止情况下的误比特率（BER），研究了理想化理论分析之外估计误差对成功率的影响，并讨论了减轻这些误差的方法。最后，本文从性能约束和预期效果出发，阐述了我们对基于PD-NOMA 的网联自动驾驶汽车部署场景的看法，并指出了以往被忽视的待解决问题。

索引词—网联自动驾驶汽车、非正交多址、软件定义无线电节点。

一、引言

网联onnèctéd自动驾驶车辆（CAV）是一种使自动驾驶车辆能够与其他车辆和基础设施通信的技术。脱离人工控制的自动驾驶车辆已不再是公众避而不谈的话题，而成为人人期待的一项技术。事故数量减少、车辆交通和运输时间缩短、车辆能效（EE）提高，以及由此带来的行业新商业模式和应用场景，都是 CAV 技术的优势。为了推动这些发展，需要一种新型模型来提升自动驾驶车辆系统，使车辆能够接入周边实时运行的通信网络，这种网络将称为车联网（V2X）。

对于网联自动驾驶汽车车联网（CAV-V2X）技术而言，实现这些功能所需的基础设施在短时间内已成为必要条件。最近，基于应用的使用领域被5G汽车协会（5GAA） [1]分类为。紧急制动、交叉路口管理、车辆维护和远程控制、车辆对驾驶员的适配以及与乘客协作、自动驾驶流程、当局使用道路的工作原理、交通密度信息单元和路由、弱势道路使用者（VRU）保护等，都是根据车辆的自动化等级（LoA）可能实施或不实施的一些不同应用场景。LoA是一种高级车联网（V2X）应用的分类方法，用于表示系统在自主环境中运行所具备的能力及要求。自动化等级从无自动化到完全自动化共分为5级；因此，每个等级的应用场景可能有所不同。例如，为了与同一车道上的另一辆车共享视觉数据，车辆应满足15 Mbps的数据速率、最大50 ms的时延以及在80米通信范围内99%的可靠性。

E.G¨uven 和 G. Karabulut Kurt 任职于加拿大蒙特利尔理工学院电气工程系，电子邮箱：{guven.eray, gunes.kurt}@polymtl.ca。C. G¨oztepe、M. A. Durmaz 和 S. Tedik Bas¸aran 任职于土耳其伊斯坦布尔伊斯坦布尔技术大学电子与通信工程系，电子邮箱：{goztepe, durmazm, tedik}@itu.edu.tr。O. Kucur 任职于土耳其科贾埃利盖布泽技术大学电子工程系，电子邮箱：okucur@gtu.edu.tr。

如今，基于正交多址接入（OMA）的系统在同一时频块中为单个用户提供服务，这限制了这一需求。然而，OMA资源早已耗尽。随着城市和农村环境将接入蜂窝网络，即所谓的蜂窝车联网（C-V2X），以及车辆数量的增加，对于呈指数增长的用户数量而言，频谱效率（SE）发挥着至关重要的作用。

本研究考察了功率域非正交多址接入（PD-NOMA）方法。该方法在来自单一源的用户之间分配功率，旨在提高移动式车载单元的频谱效率（SE），从而验证其在未来网联自动驾驶汽车车联网（CAV-V2X）技术中的实际应用潜力。

A. 面向网联自动驾驶汽车车联网的前沿*NOMA*场景

非正交多址（NOMA）技术具有一些适用于网联自动驾驶汽车车联网（CAV-V2X）系统的独特特性，因为它具有灵活性，可以像OMA一样进行部署而无需任何前提条件，并且凭借功率共享，在最大化能效（EE）的同时实现用户公平性。图1展示了基于网联自动驾驶车辆交通的V2X系统中，基于NOMA的通信网络的工作原理。路侧单元（RSU）向属于不同信道结构的车辆传输数据。概念图展示了包括自动驾驶汽车和编队行驶卡车在内的各种网联自动驾驶汽车（CAV）组件及其不同部署方式。该概念被作为我们三用户PD-NOMA测试场景的示例。

在非正交多址接入和蜂窝车联网标准化方面，目前有多项值得关注的工作，尤其是在第三代合作伙伴计划（3GPP） [2]中。由于人们对此有着浓厚的兴趣

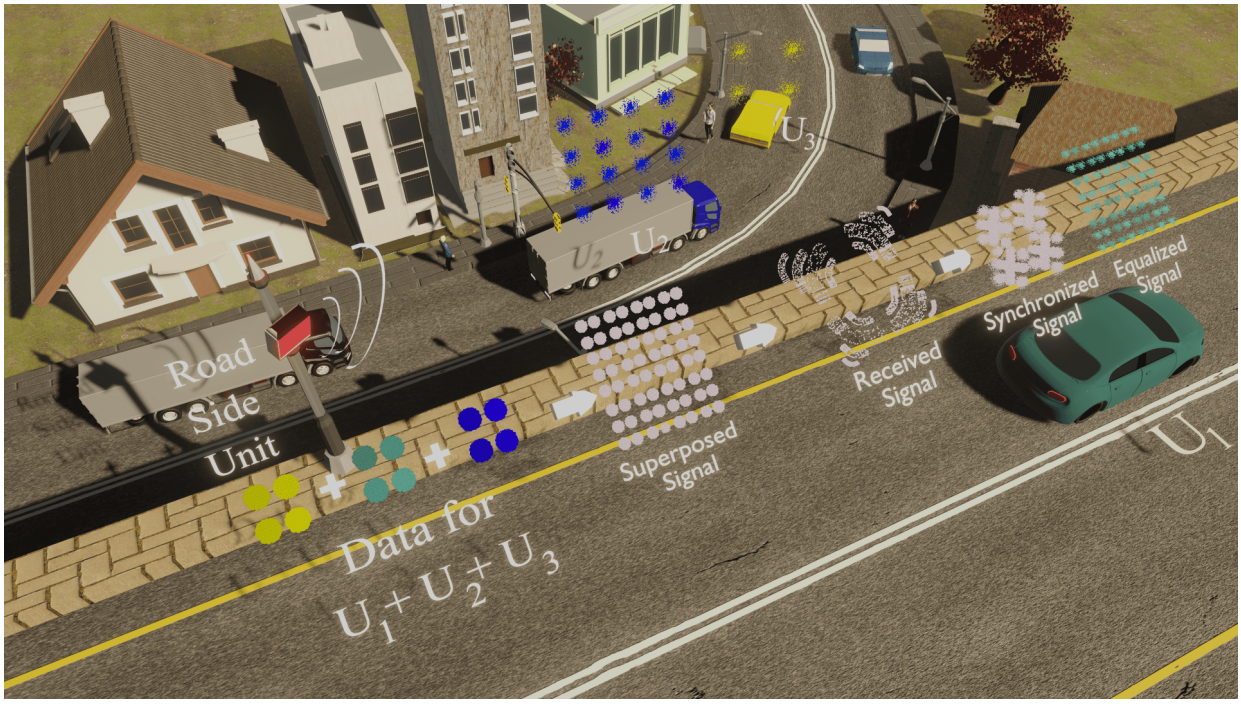


图 1：基于非正交多址接入的车联网部署场景，包含不同的网联自动驾驶汽车（CAV）组件，即自动驾驶汽车和车辆编队。

无论是学术界还是工业界，非正交多址接入研究都在 Rel-15 中重获关注。非正交多址接入工作项目完成后，针对在 3GPP Release 17 中实现非正交多址接入上行传输开展了一项研究。已决定在后续版本中继续开展基于非正交多址接入的工作项目，推动 5G网络之后的发展。

新空口车联网（NR-V2X）支持复杂的应用场景，包括车辆编队、扩展传感器、面向自动驾驶的高级驾驶以及远程驾驶。

B. 研究动机与贡献

从文献综述来看，车载通信领域似乎尚无关于非正交多址接入实时实现的研究。本研究重点考察采用现有调制和波形技术的非正交多址接入方法在车载通信中的适用性，以及该方法带来的此前未被发现的问题。随后，我们在测试环境中提出并验证了针对这些问题的可行方法和解决方案。最后，我们指出了文献中尚未涉及、计划在后续研究中探讨的问题。此外，我们通过获取误码性能测量结果，分析了非正交多址接入为车联网带来的优势与局限。我们详细介绍了软件定义无线电（SDR）在实现方面带来的便利及其引发的问题，并阐述了其中的关键要点。为说明本研究的创新性，我们通过三用户案例，以实证方法在基于蜂窝车联网的非正交多址接入中取得了成果；这一方法揭示了理论分析未能发现的差距。

本文其余部分安排如下。第二节介绍非正交多址接入和网联自动驾驶汽车的基本概念及标准化工作。第三节介绍利用软件定义无线电节点在车联网中实际实现功率域非正交多址接入的细节。第四节讨论车联网系统各个方面中需要在实时部署场景下考虑的待解决问题。第五节总结全文。

II. 基本概念

A. 网联自动驾驶汽车

凭借高效率、海量连接和低时延等特性，非正交多址接入（NOMA）为车辆通信开辟了新的维度，使其能够实现 [3]。近期一项将 NOMA 融入车联网（V2X）的研究 [4] 提出了一种新的动态资源分配结构和调度流程，可与低时延、高可靠性（LLHR）系统中的串行干扰消除（SIC）流程兼容。作为一项前瞻性研究， [5] 探讨了车载环境中多输入多输出（MIMO）NOMA 的原理。在网联自动驾驶汽车（CAV）研究领域， [6]讨论了 CAV 技术的最新进展，包括车载网络安全、视觉感知技术的可靠性以及交叉路口管理。一项实时实验研究实现了用于车对车（V2V）通信的长期演进（LTE）方案，以及用于车对行人（V2P）通信的 Wi-Fi 方案，并将其作为专用短程通信（DSRC）应用，以测量端到端时延和交付率 [7]。另一项实际研究利用软件定义无线电（SDR）通过高阶调制技术实现了车载可见光通信 [8]。与 SDR 部署类似， [9] 评估了采用 5 个用户的静态 NOMA 上行链路（UL），以模拟物联网（IoT）的

系统部署。此外，另一项近期研究表明，结合信道状态信息（CSI）和服务质量（QoS）的 SIC 技术能够消除中断概率方面的限制 [10]。另一方面，也有研究利用软件定义无线电节点（SDR nodes）对 NOMA 技术进行实时实现 [11], [12]。在 [11], 中，研究人员测试了一个 WiFi 原型，该原型侧重于所提出的物理层帧结构；同时， [12]基于误码率（BER）对 NOMA 系统进行了性能分析。

近期的一项概念验证研究 [13] 由Cisco和Verizon开展，于2022年借助移动边缘技术支持蜂窝车联网部署。这项演示测试尝试通过模块化集成路由器降低对路侧单元的依赖。研究表明，成本较低的路由器也能满足蜂窝车联网的低时延要求；不过，测得的平均车联网基础设施（V2I）端到端时延为42.833毫秒。2021年，Verizon与日产北美研究与先进工程部还开展了另一项蜂窝车联网概念验证研究，测试车载设备上的传感器网络在若干应用场景中的表现，例如行人突然出现以及车辆在无保护条件下转弯。 [14]讨论了大型汽车行业中围绕蜂窝车联网部署开展的合作与联合项目。

B. 非正交多址接入

前文提到，非正交多址接入是一种独特的机会，可通过更先进的多址接入方法，在海量连接条件下提供低时延和可靠性保障，从而实现对用户密度的控制 [15]。与正交多址接入方案（如码分多址（CDMA）和正交频分多址（OFDMA））不同，NOMA技术不依赖正交性，因此可以在一定程度上摆脱资源调度和规划操作，并成为满足预期低时延应用需求的一种候选方案。因此，NOMA不仅能够应对超密集网络（UDN）中的海量连接问题，也能解决超可靠低时延通信（uRLLC）应用中不可避免的时延问题。

本研究重点考察 PD-NOMA 对车载连接的影响。PD-NOMA 在下行链路（DL）和上行链路中的应用有所不同。在下行链路中，基站（BS）通过传输用户信号的叠加信号来实现；而在上行链路传输中，则由用户或基站根据相应的功率系数，将各用户信号组合形成。尽管弱用户（用户-1）会将其他用户视为噪声，但强用户（用户-2 等）必须采用多用户检测（MUD）方法，才能从组合信号中提取自己的数据。

用户在移除自身信号的同时，会对接收到的叠加信号应用 SIC，以消除较弱用户的信号。

III. 车联网中的非正交多址接入实际实现

测试环境与流程： 用于代表网联自动驾驶车辆系统的三辆迷你车辆组成的测试平台配置如图 2 所示。每辆车均配有一块 Arduino 微控制器、两个用于速度和方向控制的 L298N 电机驱动器，以及四个用于使车辆沿直线路径行驶的直流电机。A 线与 B 线之间的最短距离确定为 360 cm。同时，距离基站较远的车辆命名为用户-1，中间的车辆命名为用户-2，距离基站最近的车辆命名为用户-3。从出发时起，三辆车均在 3.63 s 后到达 B 线并停下。因此，历时 5.74 s 的测试在车辆停止时结束。

基站通过 USRP 型号的软件定义无线电实现向车辆进行多址数据传输。下行链路配置中共有 4 台 USRP-2943R、1 台提供供电和无线电与主机连接的 CPS-8910 型交换机，以及 1 台 PXIe-1085 型主机，其中包含 3 辆车辆（接收机）和 1 个作为基站的发射机。USRP-2943R 的实时带宽为 40 MHz，配备 16 位数模转换器和 14 位模数转换器，支持即时处理。测试工作频率下，无线电设备的最大输出功率为 20 dBm，输入功率为 -15 dBm。还应注意，这些设备的噪声系数为 5 至 7 dB，在进行低功率测量时需要将其考虑在内。

测试测量采用4进制正交幅度调制（4QAM）多载波正交频分复用（OFDM）波形，载波频率为2.34 GHz，带宽为800 kHz。开始前，用户-3与基站之间的最近距离为390 cm，用户-1与基站之间的距离为427 cm。同时，车辆之间的距离保持不变，因此可以假设用户的信道增益顺序未发生变化。这样便免去了持续为用户分配不同功率的负担。在实际场景中，只要保持信道相干时间，车辆的信道状态信息就能得到保留，并可据此进行功率分配。测试中使用的所有参数见表I。

发射机上的信号处理首先为每个用户生成随机数据。通过 4QAM 调制，将 1250 个数据比特转换为 625 个符号，并排列成 5 个 OFDM 符号向量，每个向量包含 125 个符号。将导频符号交织到符号向量中后，每个 OFDM 符号共包含 150 个子载波。随后，在快速傅里叶逆变换（IFFT）之前对传输信号进行零填充。为实现同步并防止接收机中的多径衰落，在每个向量前添加长度为 64 个符号的循环前缀。至此，基站上的操作全部完成，信号被传输至各用户。与静止系统不同，车辆速度引起的多普勒频移和信噪比（SNR）估计误差会成为载波频偏（CFO）的主要成因，进而导致载波间干扰。为研究这一问题，根据车辆的运行时间（3580 ms）和行驶总距离（313 cm），计算出运行频率下的多普勒频移为 6 Hz，平均速度为 0.876 m/s。在同步方面，针对所有车辆，检测并在接收机处校正了基于循环前缀的时频偏移联合最大似然（ML）估计值，

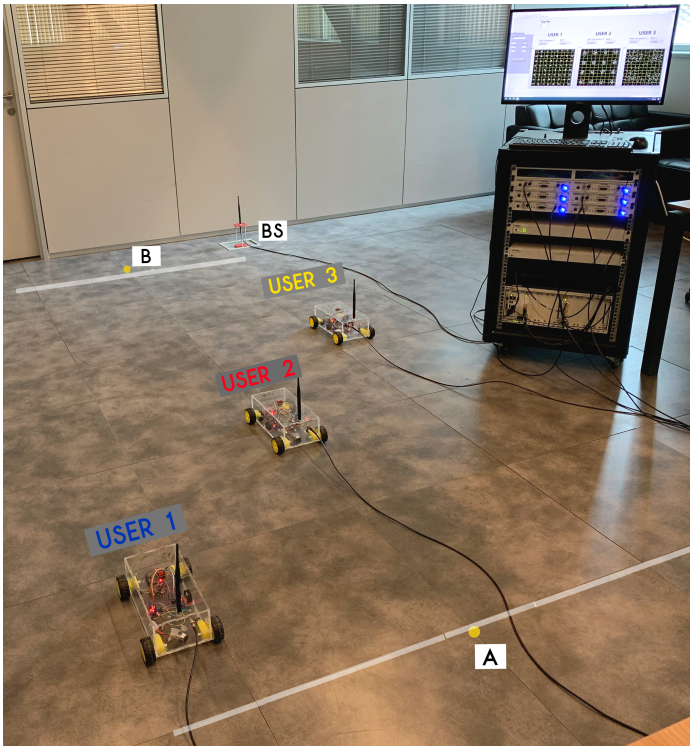


图 2：三用户 NOMA 下行测试的现场照片，展示起点（A）和终点（B）线。

且无需额外导频。完成同步并进行快速傅里叶变换（FFT）后，使用最小二乘（LS）方法，通过对添加到数据中的导频进行线性回归来执行信道估计；随后，利用信道系数和迫零均衡器进行信道补偿。通过测量导频信号的误差矢量幅度（EVM）值，为每个用户估计信噪比。接下来，如第 II 节所述，对用户-2 和用户-3 执行串行干扰消除（SIC）。每辆车获取自身数据后，测试以误码率分析结束。

如图 2 所示，测试过程分为静止和移动两个连续阶段。数据流随秒表启动后，3 辆汽车在静止阶段保持静止恰好 2.165 秒，随后从 A 线驶向 B 线，并以相同且恒定的速度行驶，同时保持彼此间距不变。测试期间，测量每辆车的信噪比、误码率和载波频偏，以分析其性能。除此项测试外，还对 620 万个信道系数绝对值的分布进行了检查，以估计室内环境的信道分布。通过最大似然估计获得非中心参数和尺度参数，得出的莱斯 K 因子为 10.92。

A. 测量过程中的关键注意事项

弱用户的信噪比估计与中断测量不确定性：测试过程中遇到了一些关键且值得注意的问题。其中之一是

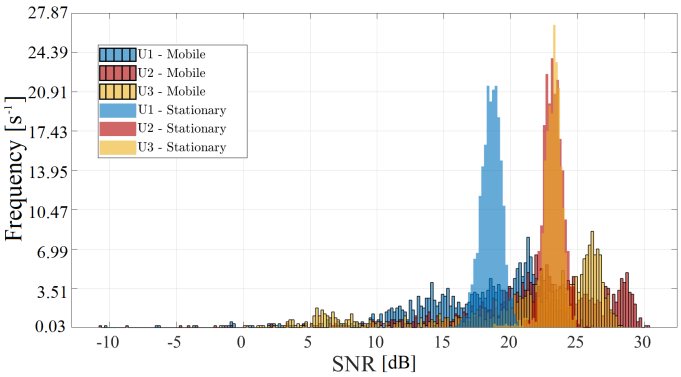


图 3：对测试静止阶段和移动阶段信噪比出现频率的考察。

由于在下行链路中对信号进行解调之前必须执行串行干扰消除操作，因此无法利用这些数据计算叠加信号的信噪比。串行干扰消除过程结束后得到的信噪比可能因串行干扰消除不完善而无法反映真实情况。信道和载波频偏估计误差也会加剧这一误差。总之，NOMA 网络中的信噪比估计可能比通常情况更加不准确。此外，采用多阶段串行干扰消除的用户往往比其他用户丢失更多数据。信噪比估计的另一个缺点是会在中断分析中引入误差。任何信噪比误判都可能导致用户发生中断。为解决这一问题，相比使用用户数据的 EVM 计算，通过导频或训练符号辅助的功率计算来估计信噪比更有意义。由于使用重复训练符号会降低频谱效率，因此在基于 NOMA 的数据传输中，最合理的信噪比估计方法是使用数量充足、与数据规律交织的导频。

由于存在同样的问题，受误差影响的导频或基于巴克码的信噪比估计无法准确给出阈值，因此可能无法准确跟踪中断。中断分析需要采用精度极高的信噪比估计方法，因为它与信噪比值直接相关。采用类似的方法，提高导频/数据比率可以提升瞬时信噪比值的估计精度。另一种方法是使用条件灵活信道估计器。不同信道中的噪声水平各异，可能需要采用不同类型的估计器，例如利用接收信号频谱形状的最大似然估计器，或信号变化比估计器。

测试期间测得的信噪比直方图如图3所示，并对比了移动车辆和静止车辆情况下的信噪比分布。由于无法通过实际方法计算接收信号的精确信噪比，因此通过这种行为可预测的比较进行验证是合乎逻辑的。测试开始时，静止车辆的信噪比值呈卡方分布；而随着移动车辆瞬时信噪比偏差幅度增大，方差也随之增大。例如，第二个用户在

静止测试中每秒平均接收 24.33 倍 23 dB 的信噪比，而在移动阶段每秒平均接收 2.47 倍 23 dB 的信噪比。静止时，每个用户的信噪比分布都可以用高斯分布表示；而在移动状态下，则无法用单一函数建模。此外，还可以认为，测试中移动车辆平均信噪比的提高是由于它们与基站之间的距离缩短所致。

针对载波频偏导致的信噪比下降问题以及远距离覆盖问题，一种可靠的解决方案是采用相控阵天线，或在上行链路中对叠加信号进行波束成形，并在下行链路中对用户进行波束成形。多波束天线和相控阵不仅能增强面向目标车辆的方向性，还能降低上行链路传输中全双工NOMA用户之间的用户间干扰。波束成形技术不仅可以防止公共区域中的被动窃听，还能在不使用随机化算法的情况下，为共享时频资源的NOMA用户设备提供信息安全。就信息安全而言，在NOMA中使用波束成形的另一项优势是，私有用户（或用户簇）可受益于更高的信干噪比（SINR），从而提升信号质量，并避免受到干扰攻击等基于干扰的物理攻击方法影响。

同步易受攻击的原因及后果：未知环境因素和硬件损伤都会影响系统的载波频偏量。随着移动系统的载波频偏预测误差增大，补偿会出现偏差，导致接收机收到损坏数据。更糟的是，信噪比估计值也会不准确。简言之，一种估计误差会削弱另一种估计的效果，这在NOMA用户中尤为明显。对于执行串行干扰消除的NOMA系统强用户，如果其使用偏移尚未校正、且部分错误的数据执行串行干扰消除过程，误差幅度就会不断累积。图4展示了OFDM符号的瞬时信噪比随时间变化的数值。从第2.11秒开始移动后，可以看到瞬时信噪比变化幅度增大。再加上预测误差，这种变化会变得难以控制。同一图中还展示了从测试开始到结束期间，瞬时误码率和载波频偏随时间的变化。显然，在测试前半段，静止车辆的估计载波频偏值较为稳定，而车辆开始移动后，数值便开始大幅波动。此外，图5给出了同一测试的误码率。误码率按错误比特数与总比特数之比计算；对于损坏且未检测到、因而未纳入误码率计算的数据数组，则将误码率设为1。车辆起步后及移动阶段开始出现非零误码率。观察发现，静止车辆的误码率为 10^{-3} 及以下，而行驶车辆的误码率有时会升至 10^{-1} 及以上。

如前所述，信噪比值是在载波频偏估计与补偿后立即计算的。这意味着载波频偏中的测量误差也会反映在信噪比值中。测试结果还显示，信噪比和载波频偏的剧烈变化彼此重叠。因此，

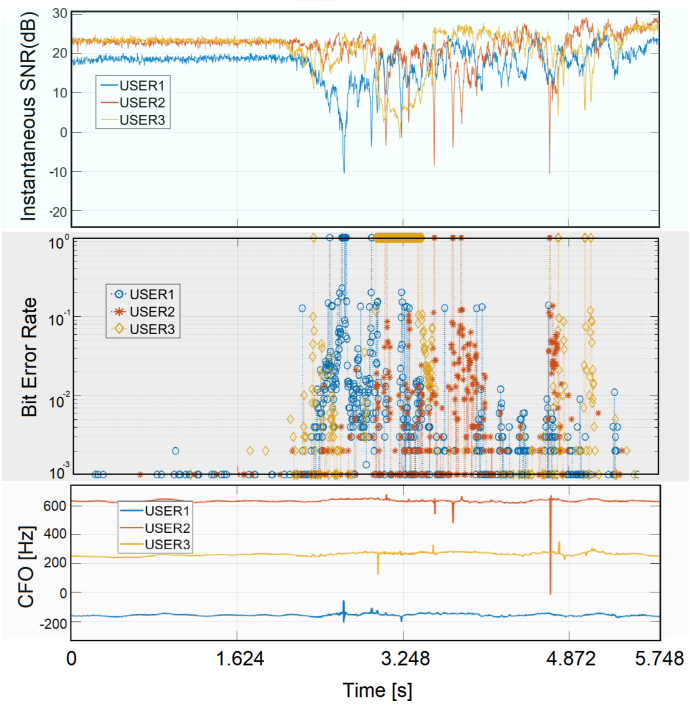


图 4：信号性能随时间的波动。

在载波频偏的峰值处，可以看到信噪比下降、误码率上升。

高阶调制中的噪声问题：在较高阶调制技术中，噪声对输入信号的影响更加明显。因此，串行干扰消除（SIC）错误也会高于通常水平。随着调制阶数的增加，误码性能会逐渐变差，而在叠加式非正交多址信号中，这种性能下降会更加明显。然而，通过选择差异较大的功率系数、利用频繁插入的导频进行高精度信道估计，以及采用适当的同步过程，可以解决这一问题。需要注意的是，执行串行干扰消除（SIC）的强用户将受到高调制阶数所导致的错误增加的最大影响。简而言之，用户经历的串行干扰消除层越多，暴露于错误的程度就越高。尽管可以通过增加强用户的功率份额来避免这一问题，但这种解决方案会使系统无谓地陷入其他问题，例如弱用户的性能损失。

下行链路中的用户间干扰：功率域非正交多址接入（PD-NOMA）带来的挑战之一，是共享相同功率的用户会相互产生干扰。系统运行的用户越多，用户之间的相互影响就越大。这种影响由多个因素决定，例如共享功率的用户数量、用户之间的距离、功率系数和载波频率；通过实际方法和分析方法，可以最大限度地减小这一问题。

为防止多用户软件定义无线电应用中的自干扰，遵循以下指南：

1）估算出适当的功率系数值。2）在测试远距离功率系数值的测量中，为了降低噪声对

表 I：系统参数

参数		值
调制		4QAM
载波频率		2.34 GHz
带宽		800 kHz
I/Q 数据速率		500 kS/sec
功率系数（由远及近）		0.761, 0.191, 0.048
发射机增益		15 dB
接收机增益		10 dB
平均速度		0.876 米/秒
起始点到基站的距离 (A)	用户-1	4.27 米
	用户-2	4.02 米
	用户-3	3.9 米
端点 (B) 处到基站的距离	用户-1	1.25 米
	用户-2	1.12 米
	用户-3	0.57 米

系统的影响，发射机和接收机输出功率保持不变，而用户的接收功率则因距离变化而有所不同。因此，影响系统的硬件变更数量减少为一项，即信源发射无线电。3）针对密集拓扑，采用干扰抑制技术，根据信道增益差异匹配强用户和弱用户。因此，在从误码性能或比特率角度分析用户时，应考虑用户的信干噪比值。

4) 鉴于非正交多址接入的特性，载波信号的同步至关重要。使用相同定时参考且同步良好的用户将大幅降低用户间干扰。同样，非线性频率和相位偏移估计方法成本较高，但却是相当可靠的选择。

动态信道中的功率分配影响：根据视距条件、信道状况的复杂程度和车辆速度，分配给用户的功率系数值未必始终有效。这表明有必要向源端反馈每个用户的信道状态信息。需要一种功率分配算法，使用户公平性达到最高水平。为解决这一问题，提出了一种功率分配方法，按照基站距离的平方为每个用户分配相应的功率系数。这有助于将信道影响降至最低。因此，这不仅能补偿弱用户的连接，还能通过增大功率差来最大限度地减少用户间干扰。

为此，为了了解在实时实验中功率系数能够多么准确地实现，将车联网测试移动阶段获得的样本与三用户功率域非正交多址仿真进行了比较。需要注意的是，作为实时测试的结果，莱斯信道因子已确定为10.92，并用于仿真。在图5中，这一比较结果以不同信噪比值下的误码率性能表示。结果似乎表明，在所使用的功率参数下，所有用户的误码性能均存在误码平台，其数量级约为千分之一。与测试结果的匹配证明，功率域非正交多址系统确实可以实现。

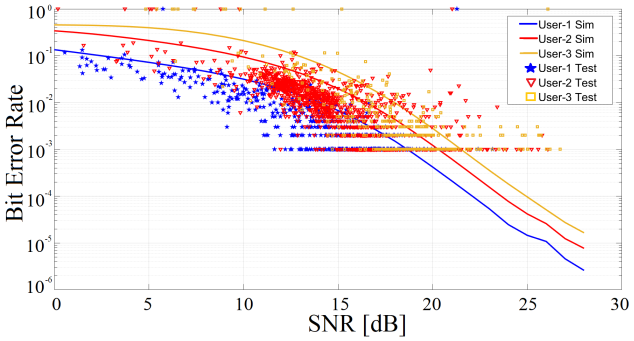


图 5：移动非正交多址车辆的性能比较。

IV. 待解决问题

法规、安全、信息安全和隐私：在自动驾驶汽车领域，需要同时满足所有法规要求的标准化活动至关重要。车辆间连接必须稳健且安全，才能提供可靠服务。与功率级别快速变化和高多普勒频移相关的物理层问题，需要得到妥善处理，以确保稳健的运行服务级别。抗干扰方法之一是频谱扫描，这是一种快速且高效的问题解决方案，可使链路在干扰攻击之前及期间找到合适的频段。另一种方法是对传输进行波束成形，由此产生的高方向性能够提高接收信号的信干噪比，从而抑制干扰器攻击。同样，认知无线电技术能够无干扰地切换到空闲信道，从而防止用户受到信号碰撞的影响。此外，还需要研究NOMA用户在串行干扰消除过程下面临来自窃听者或其他用户的威胁时的信息安全和隐私问题。

认知特征和设备到设备连接：为了进一步提高频谱效率，可以将认知特征与NOMA信令相结合，以确定合适的传输频段。为了进一步提高单位面积的频谱效率，当邻近的NOMA用户希望彼此传输时，也可以将协同变换与设备到设备连接相结合。这些特征也有助于提高系统的能效；不过，必须在考虑安全问题的前提下，妥善监测运行性能预期。此外，目标用户数量、功率系数以及传输频段的资源分配，可以通过机器学习原理来确定。

应用场景的局限性：蜂窝车联网与非正交多址接入融合技术的一大缺陷，是系统复杂度限制了其潜在应用场景。非正交多址接入能以多种方式提高系统效率，但也给用户带来一些挑战，例如误差下界、用户调度复杂度、对信道状态信息反馈的依赖，以及多普勒效应导致的额外载波频偏等。克服这些缺陷后，将会涌现出广阔的研究领域和大量机遇。深度学习NOMA与蜂窝车联网系统相结合，会因用户检测和传感器

信息处理而增加用户端的复杂度。因此，能够提升计算性能的超大规模集成（VLSI）应用有望成为解决这一问题的唯一方案。类似地，向移动非正交多址系统中的发射机反馈信道状态信息，可以同时解决多个问题，例如实现发射端波束成形和预编码，并为多输入多输出系统找到有利的传播条件。

软件定义网络原理的融合：将控制平面与数据平面分离的原则，也可以与 NOMA 信令紧密结合。例如，为提高可靠性，控制信号可以继续采用正交多址传输，而测试信号则可以按照非正交多址原理进行传输，以提升频谱效率。在另一种场景中，若控制信号相比数据信号具有更低的数据速率且要求低时延，则可将其视为弱用户信号，即低速率时延敏感信号。

V. 结论

本研究讨论了网联自动驾驶汽车车联网实时部署的需求，并通过对实时移动软件定义无线电的实验观察表明，基于非正交多址的网联自动驾驶汽车场景显而易见。研究阐明，自动驾驶车辆需要一种稳健的多址接入方法，而随着车辆数量增加，其能力也会同步提升。我们认为，非正交多址接入是当前车载网络中有限多址接入技术的复兴；实验结果表明，即将到来的自动驾驶车辆技术需求与功率域非正交多址接入的能力完全匹配。

参考文献

[1] “白皮书：蜂窝车联网应用场景的方法、示例和服务级别要求”，https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/ 5GAA 191906 WP CV2X UCs v1.pdf，访问日期：2020年12月30日。[2] J. Peisa、P. Persson、S. Parkvall、E. Dahlman、A. Grovlen、C. Hoymann 和 D. Gerstenberger，“5G演进：3GPP第16版和第17版概述”，爱立信技术评论，第9卷，第1–5页，2020年。[3] H. Lee 等，“5G新空口车联网：迈向网联协同自动驾驶”，《*IEEE*通信标准杂志》。[4] B. Di、L. Song、Y. Li 和 Z. Han，“车联网遇上非正交多址接入：面向5G赋能的车载网络的非正交多址接入”，*IEEE*无线通信，第24卷，第6期，第14–21页，2017年。[5] Y. Chen、L. Wang、Y. Ai、B. Jiao 和 L. Hanzo，“车载通信中的非正交多址接入”，载于《*5G*无线网络及未来的多址接入技术》。施普林格，2019年，第333–366页。[6] D. Elliott、W. Keen 和 L. Miao，“网联自动驾驶汽车的最新进展”，《交通运输工程学报（英文版）》，第6卷，第2期，第109–131页，2019年。

[7] Z. Liu、Z. Liu、Z. Meng、X. Yang、L. Pu 和 L. Zhang，“面向车辆和行人安全的车联网通信系统实现与性能测量”，国际分布式传感器网络期刊，第12卷，2016年9月。[8] M. S. Amjad、C. Tebruegge、A. Memedi、S. Kruse、C. Kress、C. Scheytt 和 F. Dressler，“基于符合IEEE 802.11标准的软件定义无线电的车载可见光通信系统”，载于*IEEE*国际通信会议（*ICC*），2019年，第1–6页。[9] M. Moriyama、K. Takizawa、M. Oodo、H. Tezuka 和 F. Kojima，“采用相关接收分集的上行非正交多址系统实验评估”，载于*IEEE*国际计算、网络与通信会议（*ICNC*），2019年，第894–899页。[10] Z. Ding、R. Schober 和 H. V. Poor，“揭示串行干扰消除在NOMA系统中的重要性——第1部分：技术现状与最新发现”，*IEEE*通信快报，第24卷，第11期，第2373–2377页，2020年。[11] E. Khorov、A. Kureev、I. Levitsky 和 I. F. Akyildiz，“Wi-Fi网络中非正交多址接入的原型开发与实验研究”，*IEEE*网络，2020年。[12] M. Aldababsa、C. G¨oztepe、G. K. Kurt 和 O. Kucur，“NOMA网络的误码率”，*IEEE*通信快报，第24卷，第6期，第1188–1191页，2020年。[13] 思科系统公司，“白皮书：边缘计算通过4G LTE为网联汽车应用提供低时延”，技术报告，2022年3月。[14] S. Chen、J. Hu、Y. Shi、L. Zhao 和 W. Li，“蜂窝车联网展望：技术、现场测试及中国发展的挑战”，*IEEE*物联网期刊，第7卷，第5期，第3872–3881页，2020年。[15] M. Aldababsa、M. Toka、S. G¨okc¸eli、G. K. Kurt 和 O. Kucur，“面向5G及未来的非正交多址接入教程”，无线通信与移动计算，第2018卷，2018年。

作者简介

ERAY GUVEN（guven.eray@polymtl.ca）于2021年在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得电子与通信工程理学学士学位。目前，他正在加拿大蒙特利尔理工学院攻读博士学位，蒙特利尔，´´

CANER GOZTEPE（goztepe@itu.edu.tr）分别于2017年和2019年在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得电子与通信工程理学学士学位和电信工程理学硕士学位。目前，他正在伊斯坦布尔技术大学攻读博士学位。

MEHMET AKIF DURMAZ（durmazm@itu.edu.tr）分别于2018年和2021年在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得电子与通信工程理学学士学位和电信工程理学硕士学位。目前，他在Turkcell Technology担任研发工程师。

SEMIHA TEDIK BASARAN（tedik@itu.edu.tr）在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得理学学士学位、理学硕士学位和博士学位。她目前是土耳其伊斯坦布尔伊斯坦布尔技术大学电子与通信工程系的助理教授。

GUNES KARABULUT KURT（gunes.kurt@polymtl.ca）于2006年在加拿大安大略省渥太华的渥太华大学获得电气工程博士学位。她现任职于加拿大蒙特利尔理工学院电气工程系。

OGUZ KUCUR（okucur@gtu.edu.tr）于1998年在美国芝加哥的伊利诺伊理工学院（伊利诺伊理工学院）获得电气与计算机工程博士学位。他目前是土耳其科贾埃利盖布泽技术大学电子工程系的正教授。