

面向6G的无线信道语义特征及建模

张正宇,何睿斯*,杨 汨,张雪剑,戚子羿,元 媛,艾 渤

(北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044)

摘要: 随着移动通信技术的发展演进,6G(6th-Generation)网络作为新一代智能化数字信息基础设施,将不再仅聚焦信号的传输和复现,更需要基于电磁传播过程实现对周围环境的高效感知和理解,从而获取信道语义知识,协助智能通信体的预测、决策、波束成形等。因此,相较于传统信道而言,赋予无线信道模型对物理环境的语义理解、重构、表达能力,已成为智能无线信道模型的重要特征。本文提出了一种无线信道语义的分析和建模方法,将信道语义定义为状态语义、行为语义和事件语义3种层级,分别对应信道瞬态多径、信道时变轨迹和信道拓扑结构。此外,基于车载通感一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC)信道测量系统,开展了28 GHz下面向信道语义表征的无线信道测量,基于实测数据对信道语义进行解构、标识、建模,重点分析了3种不同语义下的信道多径分布特性,完成了语义导向的信道生成,结果表明信道语义模型能够在生成较准确信道的同时,表达更丰富的语义信息。本文工作是在语义层面上探索智能信道建模的新方法,通过深入挖掘无线信道的内在语义特征,促进通信系统在理解和认知环境方面的能力,从而提高通信效率和质量。

关键词: 6G;无线信道建模;信道语义;通信感知一体化;车载信道测量

基金项目: 国家自然科学基金(No.62271037)

中图分类号: TN.92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)01-0014-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240595

Semantic Characteristics and Modeling of Wireless Channels for 6G

ZHANG Zheng-yu, HE Rui-si*, YANG Mi, ZHANG Xue-jian, QI Zi-yi, YUAN Yuan, AI Bo

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of mobile communication technology, 6G (6th-Generation) networks, as the next generation of intelligent digital information infrastructure, will no longer only focus on the transmission and reproduction of signals. Instead, they will need to achieve efficient perception and understanding of the surrounding environment based on the electromagnetic propagation, acquire semantic knowledge to assist intelligent communication agents in prediction, decision, beamforming, and more. Therefore, compared to traditional channel models, improving wireless channel models with the ability to understand, reconstruct, and express the physical environment's semantics has become an important characteristic of intelligent wireless channel models. This paper proposes a method for semantic analysis and modeling of wireless channels, which includes three levels of semantics: state semantics, behavior semantics, and event semantics, corresponding to the instant multipath of the channel, the time-varying trajectory of the channel, and the topological structure of the channel, respectively. In addition, based on the vehicular integrated sensing and communication (ISAC) channel measurement platform, this paper conducts semantic-oriented wireless channel measurements at 28 GHz. The channel semantics are decomposed, identified, and modeled based on the measured data, with a focus on analyzing the multipath distribution characteristics of the channel under three different semantics, and completing the semantic-guided channel generation. The results show that the channel semantics model can generate more accurate channels while expressing richer semantic information. The work in this paper explores new methods for intelligent channel modeling at the semantic level, promoting the ability of communication systems to understand and recognize the environment by deeply mining semantic features of wireless channels, thereby improving communication efficiency and quality.

Key words: 6G; wireless channel modeling; channel semantics; integrated sensing and communication; vehicular channel measurement

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62271037)

1 引言

随着信息技术、移动通信技术、人工智能与大数据技术的深度融合,新兴业务场景驱动着第五代无线通信系统(5th-Generation, 5G)向第六代无线通信系统(6th-Generation, 6G)演进. 作为新一代智能化数字信息基础设施,6G 不仅仅是现有通信技术的改进,更被认为是传统通信范式的一次根本性转变^[1]. 在 6G 愿景中,期望采用通感一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC)技术,以增强无线设备的原生感知能力,使无线通信系统能够“看到环境”^[2]. 此外,基于人工智能(Artificial Intelligence, AI)和计算机视觉(Computer Vision, CV)的发展,无线通信系统被赋予更深入地“理解环境”的能力,即通过感知并适应环境来动态实现智能决策和改进性能^[3]. 在语义信息辅助的通信业务下,催生了许多新兴应用,例如环境重建、增强定位和跟踪、人体姿态检测、车辆检测等^[4]. 语义信息已成为 6G 网络的一个新颖且潜在的信息维度. 因此,6G 网络将不再仅聚焦信号的传输和复现,而将具备语义认知、识别、分析、理解和推理能力^[5],同时语义信息将成为 6G 内生智能的基石,作为新的潜在信息维度推动通信网络架构从传统的数据驱动向语义驱动的范式转变.

准确的语义信息可以为信源编码、信道建模和通信任务等提供结构化的语义知识网络和可扩展的语义知识库,从而支持 6G 原生智能网络的认知、识别、分析、理解和推理能力^[6]. 近年来受到广泛关注的语义通信,将图像、语音和文本中包含的对象标签或特征定义为语义符号,形成语义知识库,通过利用变分自编码器等在内的神经网络技术对信源符号进行压缩和特征提取,完成信源-信道联合编码,以实现有效而准确的信息传输^[7-9]. 然而,语义通信的研究主要集中在从发射机到接收机的内容传输上,在这一过程中,携带信息的物理信号一般包含比所观察到的源信号更加丰富的语义信息,此时的语义信道被视为“语义传输的管道”,强调的是信道在传输过程中承载的语义信息,而非信道本身,而后者才是与周围环境建立映射关系的基础^[10].

事实上,客观物理环境是无线信道特性的根本决定因素,而无线信道中的多径成分、簇分布等是反映环境的关键元素和获取感知信息的重要来源,两者之间存在密切关系^[11-13],并通过信道建模来实现模型化. 传统信道建模的主要方法包括统计性建模、确定性建模和基于几何的随机建模. 统计性建模通过分析信道的统计特性,提取重要的参数和概率分布,利用这些统计信息建立空间信道模型,其中包括宽带的时延线性模型^[14]和基于散射体簇的宽带方向性模型^[15]. 确定性建模要求获取信道环境的详细信息,基于几何光学和一致性几何绕射理论的射线跟踪技术来还原信道,并研

究信道的时变特性^[16]. 基于几何的随机建模基于波传播原理有效统计散射体分布,可以进一步分类为基于规则形状^[17]和非规则形状的模型^[18],取决于散射体是否被规则放置,通过几何关系获取多径时延、多普勒频移、到达角度和发射角度,进而得到信道冲击响应. 然而,上述模型在建模时均没有考虑信道的语义特征,对于 6G 网络而言,需要基于电磁传播过程实现对周围环境的高效感知和理解,获取语义信息从而协助智能通信体的预测、决策、波束成形等^[19]. 因此,相较于传统信道而言,赋予信道模型对物理环境的语义理解、语义重构、语义表达能力,成为面向 6G 网络的智能无线信道模型的重要特征^[20]. 与语义通信中“语义信道”的概念不同,本文中无线信道语义的研究集中在信道自身,作为表征电磁环境与物理环境相互映射关系的“桥梁”,它反映了环境中关键反散射体信息及其对电波传播的影响,通过将复杂物理环境与电波传播机制、信道特征、多径分布规律等建立结构化的语义知识库,实现无线信道模型对高级语义信息的表达以及复杂语义信息在电磁传播中的投影. 近年来,无线信道模型越来越多地开始关注电磁传播过程与复杂物理环境之间的映射关系. 文献[21]提出了一种基于感知重构环境的多边形信道重构方案,从而基于电磁散射体实现对物理环境的重构;文献[22]基于单跳信道模型,在 4.65 GHz 和 14.25 GHz 上实现了电磁波与散射体定位的结果;文献[23]基于实测数据完成簇结构的 ISAC 统计信道建模,通过将多径簇与环境中的散射体映射,实现对“通信”与“感知”之间相关性和差异性的表达;文献[24]提出了一种用于映射散射和镜面散射的新状态模型,该模型允许使用卡尔曼滤波器和随时间有效跟踪单个散射体. 然而,这些研究在建立映射关系时没有考虑可理解的语义信息,大部分以实现散射体定位或重建为目的,因此缺乏对特定语义知识下的信道特征描述,难以建立基于语义知识库的模块化信道模型,极大地限制了智能无线信道模型的表达能力. 也有一些研究强调了语义信息在无线信道模型中的作用,例如文献[25]定义了面向任务的传播环境语义,以相关信道特性为基础,研究并实现了环境语义辅助的波束预测方法;文献[26]提出了一种针对感知场景定制的基于预测信道的语义通信系统,可以利用基于目标的语义信息来满足特定的应用需求. 然而,这些语义信息是为特定通信任务或通信系统设计,需要进一步探索以信道为核心的语义模型研究,以揭示电磁传播过程中与环境直接相关的语义表达,满足 6G 对无线信道模型智能化的需求.

综上所述,为了深度挖掘无线信道中的语义信息,赋予无线信道模型对物理环境的语义表达能力,实现

通信过程中对周围环境的高效感知和理解,本文提出了无线信道语义模型及其建模方法.具体来说,信道语义模型由状态语义、行为语义和事件语义组成,分别对应于信道瞬态多径、信道时变轨迹和信道拓扑结构.此外,本文基于 28 GHz 下的车载 ISAC 信道实际测量,对信道语义进行解构、标识、建模以及语义导向的信道生成.本文的研究旨在从语义层面提供智能信道建模的新范式,挖掘无线信道中的深层特征,使得通信系统基于电磁传播过程有效地感知和理解环境.

2 面向语义的车载 ISAC 信道测试

车载 ISAC 场景是通感一体化中重要的应用场景,通过这种方式,ISAC 辅助的车载 V2X (Vehicle to Everything) 网络可以将车辆与周围的车辆、交通基础设施、行人和网络连接起来,并利用更准确的感知信息做出更好的智能体决策^[27].尽管已有一些关于 ISAC 信道建模的研究,例如文献[28]提出了一种基于几何的 ISAC 信道模型,文献[29]提出了一种面向车载系统的 ISAC 信道模型,但这些研究均没有基于实测考虑信道中的语义含义,缺乏对传播环境深度感知信息的挖掘与重建.为了实现基于实测数据信道语义建模,同时验证信道语义模型的有效性,本文面向通感一体化典型应用场景开展了 28 GHz 毫米波频段的车载 ISAC 信道传输特性测量,同步采用全景相机分析真实环境中的语义信息.本章详细介绍测量过程中使用的车载 ISAC 无线信道测量系统,并对测量开展的场景和测量过程进行描述.

2.1 信道测量系统

面向车载 ISAC 的信道测量系统设计如图 1 所示.整个完整的测量系统包括基于宽带信号发生器的发射端 (Transmitter, TX)、基于宽带信号分析仪的接收端

(Receiver, RX) 和基于逆变器和不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 的车辆电源供应.对于 TX, 采用国家仪器公司 PXIe-5745 作为宽带信号发生器,该模块可以生成 1 GHz 带宽的基带信号.随后该基带信号可以通过毫米波上变频器转换为 28 GHz 频率的毫米波射频信号,并通过增益为 28 dB 的功率放大器和 20 dB 增益的定向喇叭天线进行发射,定向喇叭天线具有 18° 的波束宽度.发出的测量信号经过周围散射体的反散射,携带着无线信道传输特性到达 RX,从而完成信道测量.对于 RX,接收天线是一个 4×8 的 32 单元矩形阵列天线,每个阵元通道具有 5 dB 增益,不同通道通过分集效应增强接收到的回波信号.之后,不同通道的回波信号经过低噪放大,再通过高速电子切换开关轮流快速经过毫米波下变频器,从而实现将毫米波频段转换为基带信号.宽带信号分析仪用于采样分析基带信号,并存储到存储硬盘中.在车载 ISAC 信道测量过程中,随着车辆运行环境快速变化,为了绑定无线信道数据与周围环境的映射关系,在接收端天线位置处固定有全景相机,从而收集和存储来自周围环境的 RGB 视频数据,辅助信道多径和环境散射体之间建立映射. TX 和 RX 由铷原子参考时钟和全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 天线实现同步,经过 GNSS 天线校准,铷原子参考时钟可以提供 10 MHz 参考时钟以及车辆的坐标位置信息.由于车辆电源是 12 V 的直流电源,需要转换为 220 V 交流电才可支持测量设备的正常运行,因此采用逆变器将车载 12 V 直流电转换为 220 V 交流电,并通过 UPS 为测量设备提供稳定的电源.面向车载 ISAC 的信道测量系统详细配置见表 1. 在进行测量之前,进行背对背校准,以消除测量设备(如电缆、开关、收发器等)的影响,从而确保准确的无线信道测量数据.

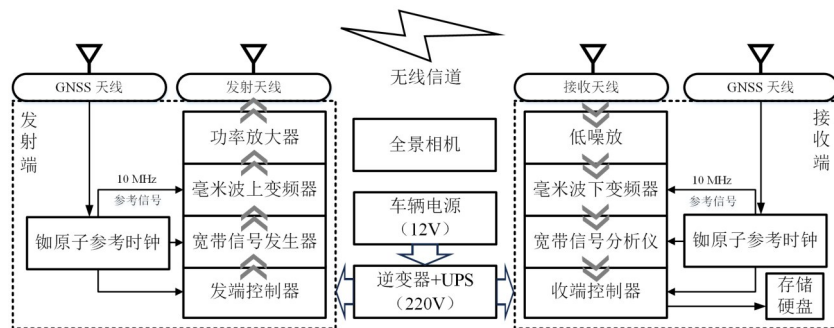


图 1 面向车载 ISAC 的信道测量系统

2.2 信道测量场景

在测量过程中,面向车载 ISAC 的信道测量系统置于车辆顶部,并沿着车辆一侧展开测量,如图 2(a)所

示,车辆行驶的左侧为测量方向.图 2(b)给出了测量设备的实拍图,设备的架设高度约 1.5 m.测量场景选择在中国广东省东莞市松山湖区进行,测量街道位于城

表 1 面向车载 ISAC 的信道测量系统参数

参数	值
中心频率/GHz	28
带宽/GHz	1
发射功率/dBm	28
时延分辨率/ns	1
行驶速度/(km·h ⁻¹)	30
天线高度/m	2.3

市市区中,测量路线如图 2(c)所示,周围是密集排列的建筑物和带状分布的街道.在整个测量过程中,车辆的平均速度为 30 km/h,持续时间为 60 s,主要的散射体包括建筑物、停车区车辆、中央隔离栏和对向车辆.由于车辆的快速移动,这些散射体会导致信道中多径的动态变化^[11].此外,由于这些散射体沿着道路呈带状分布,所以在大部分测量时间内都可以在信道中感知到明显的来自散射体的多径.

3 信道语义模型

本文提出的信道语义模型如图 3 所示.将传统的时变信道模型解耦为多层次的语义信息,分别对应信道拓扑结构、信道时变轨迹以及信道瞬态多径.在提出的模型中,信道语义划分为状态语义、行为语义以及事件语义,从而完成物理客观环境与电磁传播环境之间



图 2 车载 ISAC 信道测量方案

的映射,实现对无线传播环境的语义级重构.为了满足语义的可解释性和可扩展性,信道语义模型应具备在典型事件场景下表达状态与行为之间隐含关系的特征,同时能够存储历史行为以供推理、预测和语义查询使用.在整个信道语义构成中,语义层级由低到高分别是状态语义、行为语义以及事件语义,其中,低层级语义是高层级语义的基本组成元素,而高层级语义是多个低层级语义的联合表达.

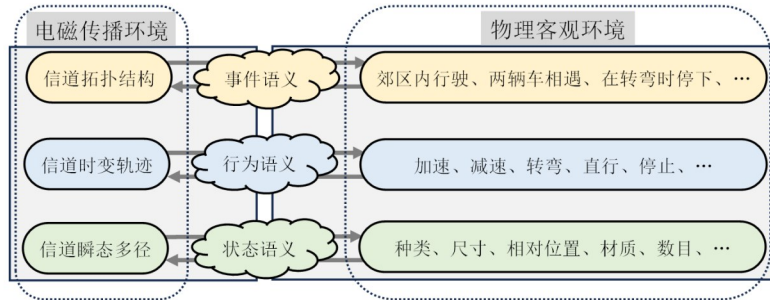


图 3 信道语义模型

在信道语义模型中,状态语义被定义为单张快照中瞬态多径的分布特征,主要体现在功率和时延分布上,属于散射体自身属性带来的语义信息.状态语义用于描述瞬时的基本物理客观环境,不包含与时间相关的额外语义信息.例如,受收发端影响的自身状态语义,包括时间、速度、高度、位置(经度和纬度坐标)等;受周围散射体和感知目标影响的对象状态语义,包括大小、数量、类别、材料等.作为信道语义模型中的基本语义单元,连续时间演进的状态语义进一步表达出行为语义.定义状态语义的数学模型如下所示:

$$S(t_s) = \{P(t_s, \tau_{i \in R}), \tau_{i \in R}\} \quad (1)$$

其中, τ 和 P 分别属于 t_s 时刻下状态语义 $S(t_s)$ 对应的多径集合 R 中的时延和功率.

在信道语义模型中,行为语义被定义为连续快照中动态多径的时变轨迹,主要体现在一定时延、时间范围内多径的变化规律上,例如多径数目变化、时延变化、功率变化等,表示随着时间的持续变化而发生的动作行为.与状态语义不同,行为语义只反映轨迹本身的运动特征,例如加速和减速、出现和消失、接近和远离等,它不包括运动行为与其周围环境之间的交互而带来的语义信息.定义行为语义的数学模型如下所示:

$$B(t_b, \tau_b) = \{T_b, D_b, S_{i \in N}\} \quad (2)$$

其中, t_b 是行为语义 $B(t_b, \tau_b)$ 的起始时间, τ_b 是行为语义 $B(t_b, \tau_b)$ 的起始时延位置, T_b 是行为语义 $B(t_b, \tau_b)$ 的持续时间, D_b 是行为语义 $B(t_b, \tau_b)$ 在时延上的覆盖长度, $S_{i \in N}$ 是行为语义 $B(t_b, \tau_b)$ 中包含的所有状态语义组合, N 为对应的状态合集.

在信道语义模型中, 事件语义被定义为宏观场景中多个小区域信道的拓扑结构, 主要体现在该场景下多个状态语义、行为语义的联合表达上, 从而构成更复杂、更高层级的语义信息. 例如, 2 辆车接近的整个过程可以被视为一个事件. 事件还可以表示为更大的时间和空间范围内发生的过程, 例如车辆停止同时, 行人在马路上加速穿过, 可以被视为一个完整的事件“红灯停”. 事件语义中对应的多种状态和行为可以表示为一种具有逻辑关系的语义聚合. 定义事件语义的数学模型如下所示:

$$E(t_e) = \{T_e, B_{i \in Q}\} \quad (3)$$

其中, t_e 是事件语义 $E(t_e)$ 的起始时间, T_e 是事件语义 $E(t_e)$ 的持续时间, $B_{i \in Q}$ 是事件语义 $E(t_e)$ 中包含的所有行为语义组合, Q 为对应的行为合集.

4 基于实测的信道语义建模

基于第 2 节的实测车载 ISAC 信道数据集, 本节展开对 ISAC 场景下的语义分析和信道建模. 整个过程包括语义解构、语义标识、语义建模以及信道生成. 需要注意的是, 尽管本文是面向通感一体化典型应用场景开展相关的测量、语义分析和信道建模, 但其模型结构和方法具有广泛适用性, 能够泛化到其他场景. 一方面, 提出的信道语义模型由状态语义、行为语义和事件语义 3 个部分组成, 这种层次化的语义分类方法可以灵活地适应不同场景下的特征描述; 另一方面, 通过对信道多径分布特性进行标准化和统计分析, 建立了针对语义的统计模型, 这使得在不同场景下可以灵活自定义多径布局, 具有更加泛化的描述范围.

4.1 语义解构

在完整的 ISAC 信道测量过程中, 包含了多样化的事件, 因此在具体的语义分析和建模之前, 需要将整个测量过程进行语义解构, 形成不同的事件语义. 图 4 为实测过程的路线图以及对应的功率时延谱 (Power Delay Profile, PDP), 测量时间为 60 s, 对应 600 张快照. 可以看到, PDP 上具有较为明显的多径变化, 对于单张快照而言, 多径的分布反映着环境中散射体的状态语义; 对于连续多张快照而言, 多径的轨迹反映着当前所进行的行为语义, 不同状态语义和行为语义组合成不同的事件语义.

结合实测过程中的雷达点云和 RGB 图像数据, 同

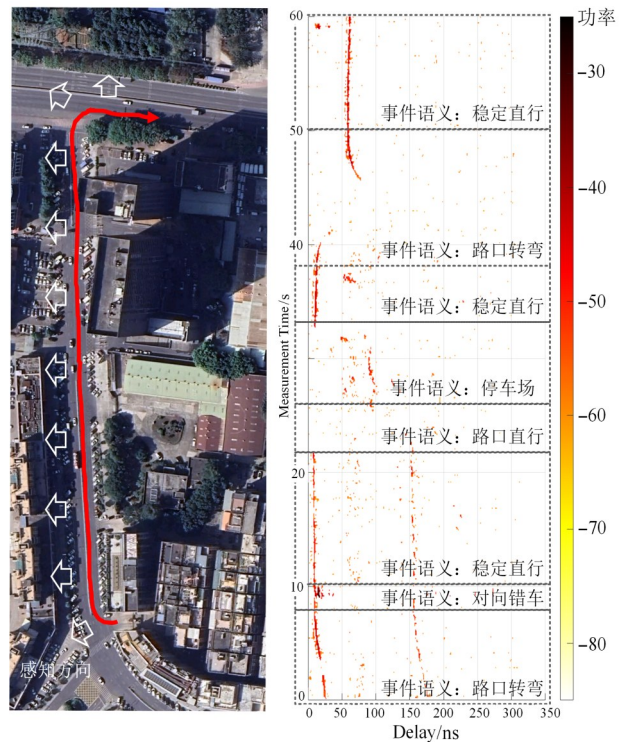


图 4 实测路线图以及对应的功率时延谱

步到每个快照对应的时序标签上, 可以得到语义解构后的区间范围. 在快照索引 1~90 时, 对应的事件语义为“路口转弯”, 此时车辆从支路右转汇入行驶主干道; 在快照索引 91~100 时, 对应的事件语义为“对象错车”, 此时对向车道有一辆大型货车迅速驶过; 在快照索引 101~218 时, 对应的事件语义为“稳定直行”, 此时车辆保持稳定的速度沿直线前进; 在快照索引 219~252 时, 对应的事件语义为“路口直行”, 此时车辆直行驶过一十字路口; 在快照索引 253~329 时, 对应的事件语义为“停车场”, 此时车辆经过停车场区域, 相比之前, 环境变得更加空旷; 在快照索引 330~381 时, 对应的事件语义为“路口直行”, 此时车辆保持稳定的速度沿直线前进; 在快照索引 382~500 时, 对应的事件语义为“路口转弯”, 此时车辆右转进入另一条车道中; 在快照索引 501~600 时, 对应的事件语义为“稳定直行”, 此时车辆沿着新进入的车道保持稳定的速度直线前进. 对于每个单独的事件语义, 均包含不同的状态语义和行为语义, 需要结合雷达点云和 RGB 图像数据针对性地对不同多径进行语义标识, 从而分析不同状态语义和行为语义之间的拓扑结构.

4.2 语义标识

根据拆解出来的不同事件语义区间, 可以看到在时延域上, 同一事件下的多径分布具有明显的可分辨区间, 因此本文通过多径在空间中的传播距离, 即对应的时延域范围, 快速为多径簇标识语义信息. 图 5 为测

量过程中街道的主要布局图,感知方向向车辆左侧,在 PDP 中能反映到环境中的主要散射体为建筑物、停车区的车辆、对向车道的车辆以及中间的隔离栏. 道路的带状分布,使得可以基于感知距离对多径分类,赋予语义标识信息. 例如,建筑物对应的感知距离为 21~30 m,停车区的车辆对应的感知距离为 7.5~15 m,对向车道的车辆对应的感知距离为 2.5~7.5 m,隔离栏对应的感知距离为 0~2.5 m.



(a) 街道的主要布局图

(b) 环境中的主要散射体

(c) 基于感知距离标识的语义信息

图 5 实测信道中对应的语义标识

4.3 语义建模

基于标识好的语义信息,对每种语义下的信道多径进行建模,包括多径数目、多径时延和多径功率. 由于每个快照中的多径分布不尽相同,且对于每种语义而言,多径需要统一的标准化才能用于构建结构化语义知识库,因此本文首先计算不同快照下每个语义标识对应多径的簇心. 通过计算不同语义下多径的时延加权平均值和功率平均值,得到不同快照下每个语义标识的簇心 $(\bar{\tau}, \bar{P})$,其计算方式为

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{m=1}^K P_m \cdot \tau_m}{\sum_{i=1}^K P_i} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_i \quad (5)$$

$$f(\Delta\tau, \Delta P) = \frac{1}{2\pi\sigma_\tau\sigma_P\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(\Delta\tau-\mu_\tau)^2}{\sigma_\tau^2} + \frac{(\Delta P-\mu_P)^2}{\sigma_P^2} - \frac{2\rho(\Delta\tau-\mu_\tau)(\Delta P-\mu_P)}{\sigma_\tau\sigma_P}\right]\right) \quad (8)$$

其中, μ_τ 和 μ_P 是时延和功率的均值, σ_τ 和 σ_P 是时延和功率的标准差, ρ 是时延和功率之间的相关系数.

图 6 显示了隔离栏、停车区和建筑物 3 种语义标识下时延-功率的二维高斯混合模型的拟合效果. 从图中可以看到,不同语义下具有明显不同的分布特点:对于隔离栏,由于感知距离较近,很多功率较弱的多径也可以被接收到,因此其对应的多径在时延和功率上均有更大的扩展,标准差分别为 0.477 和 1.978;对于建筑物,感知距离较远,只有能量较集中的主要反射径可以被接收到,因此其对应的多径在时延上扩展较小,但不同的建筑材料、角度和表面形状不同,其对应的多径在功

以拆解出的事件语义“稳定直行”为例,对应快照索引为 100~218,其有明显多径分布的区域主要有 3 个部分:建筑物、停车区以及隔离栏,三者 in PDP 上覆盖的主要时延范围分别为 140~200、50~100 和 0~50 ns,对应的感知距离分别为 21~30 m、7.5~15 m 和 0~7.5 m,符合街道中主要散射体的布局. 需要注意的是,该事件语义中并不包含对向车辆的错车,因此本事件语义中不进行此类状态语义的标识.

其中, K 为语义标识下的总多径数目, τ 和 P 分别为多径对应的时延和功率. 之后基于簇心对同一语义下的多径分布进行标准化,从而在信道生成过程中,可以通过预置的簇心位置直接得到对应的多径分布. 基于簇心的标准化过程为

$$\Delta\tau = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\bar{\tau}} \quad (6)$$

$$\Delta P = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \quad (7)$$

在对多径进行标准化后,统计分析每种语义对应的时延-功率二维高斯分布,用于拟合每种语义下相对于簇心的多径时延-功率概率密度函数(Probability Density Function, PDF),即 $(\Delta\tau, \Delta P) \sim \mathcal{N}(\mu_\tau, \mu_P, \sigma_\tau^2, \sigma_P^2, \rho)$,二维高斯分布模型可以表示如式(8).

率上扩展较大,标准差分别为 0.212 和 1.232;对于停车区,感知距离较远且目标物体单一,大部分是类似材质的车辆,因此其对应的多径在时延和功率上均有更小的扩展,标准差分别为 0.023 和 0.167. 此外,由于基于簇心对同一语义下的多径分布进行了标准化,3 种语义的时延、功率均值都在 0 附近. 表 2 归纳了不同语义下参数 μ_τ 、 μ_P 、 σ_τ 、 σ_P 和 ρ 的估计结果.

通过对测量结果中多径信号的跟踪,可以分辨出每种语义对应的多径信号. 统计分析显示,多径信号数目 K 的 PDF 服从 t 位置尺度分布,可以表示如式(9).

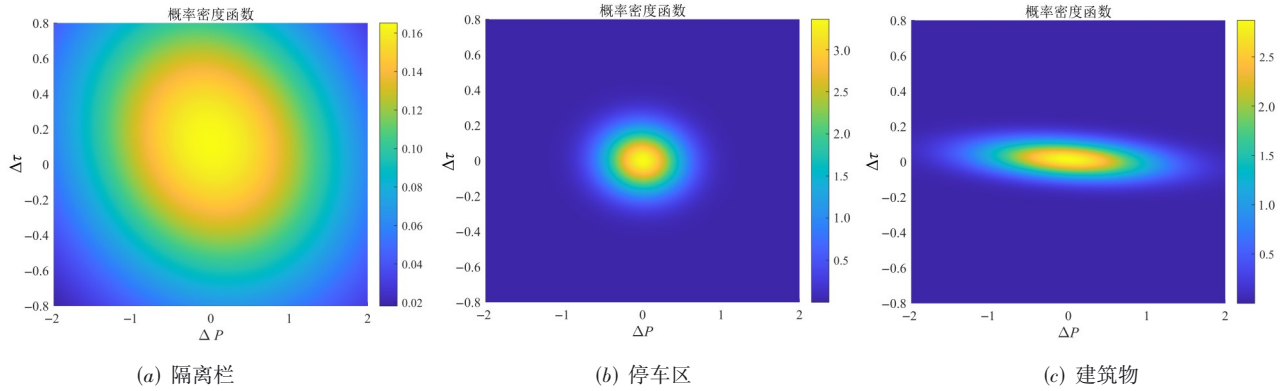


图6 不同语义下的时延-功率二维分布拟合结果

表2 信道语义模型拟合参数

标识	μ_τ	μ_p	σ_τ	σ_p	ρ	ν	μ_K	σ_K
隔离栏	0.129	0	0.477	1.978	-0.129	20.863	10.743	4.353
停车区	0.147	0	0.212	1.232	-0.147	4.314	8.214	3.417
建筑物	2.89×10^{-5}	0	0.023	0.167	-2.89×10^{-5}	2.593	7.551	3.278

$$f(K) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right) \sigma_K} \left(1 + \frac{(K-\mu_K)^2}{\nu\sigma_K^2}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}} \quad (9)$$

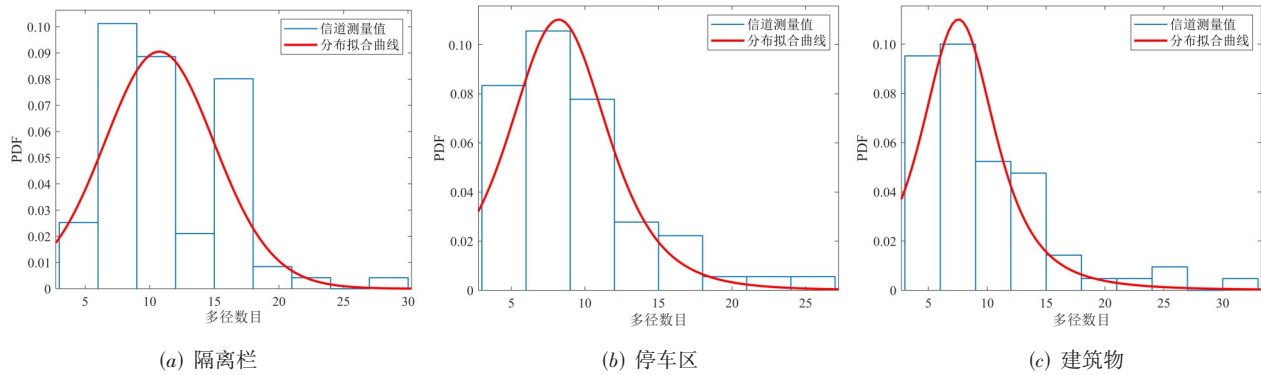


图7 不同语义下的多径数目分布拟合结果

4.4 信道生成

信道语义模型通过将事件语义的拓扑结构和行为语义的轨迹与信道生成过程相结合,能够提供对实际信道特性的准确模拟.模型的核心在于通过簇心的精确定位和动态演变,生成符合实际环境特征的多径信道.理论上,这种方法依赖于多径传播理论,其中信号在传播过程中因环境中的反射、散射和绕射现象形成多个路径.这些多径分量在实际信道中表现为不同的时延和强度,对信号的传输质量和性能有显著影响.而信道语义模型通过对环境中各种对象(如隔离栏、停车区、建筑物)的语义特征进行建模,将这些特征转化为多径分量,从而实现了对信道特性的准确模拟.模型中的

其中, ν 、 μ_K 和 σ_K 为 t 位置尺度分布模型参数.

图7显示了隔离栏、停车区和建筑物3种语义标识下多径数目的指数分布模型的拟合效果.从图中可以看到,对于多径数目而言,指数分布具有较高的模型拟合精度,且与之前分析一致,隔离栏语义对应着最多的多径数目,均值为10.743,停车区和建筑物次之,分别为8.214和7.551.表2归纳了不同语义下参数 ν 、 μ_K 和 σ_K 的估计结果.

簇心动态演变是关键,它模拟了信号遇到不同环境特征时的传播变化.例如,簇心的移动可以模拟信号在不同障碍物或反射面前的传播情况.这种方法通过模拟不同环境条件下的多径特性,能够有效地再现实际信道的复杂性,从而准确预测信道的均方根时延扩展(RMS Delay Spread).均方根时延扩展是衡量信号在接收机处到达时延分布宽度的重要指标,直接影响信号的解调和系统性能.模型通过对簇心的调整来控制多径分量的时延和强度,从而在仿真信道中实现与实际信道相符的时延扩展特性.

如图8所示,在仿真结果中,实测信道的均方根时延扩展为69.06 ns,而模型生成信道的均方根时延扩展为

65.24 ns. 这种一致性表明,模型能够准确反映实际信道的传播特性. 进一步的统计分析显示,生成信道的累积概率分布与实测信道高度一致,90%的实测信道和生成信道的均方根时延扩展都在 90 ns 以内,这表明模型在不同情况下具有稳定性和准确性,如图 9 所示. 通过准确模拟不同环境条件下的信道特性,可以用于 ISAC 系统的感知性能分析,评估系统在各种环境条件下的表现,进而提升系统的可靠性. 同时,结合环境的语义信息,模型能支持智能设备对环境的感知和适应,从而推动智能环境感知技术的发展.

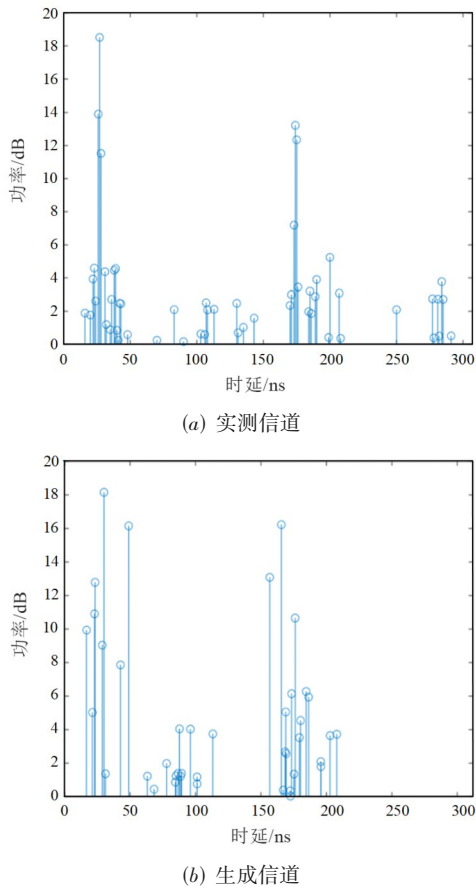


图 8 实测信道与基于语义模型的生成信道

综上所述,信道语义模型通过综合考虑环境语义信息,能够生成与实际信道特性一致的信道模型,不仅在仿真结果的准确性上表现优异,还在表达丰富语义信息方面具有显著的优势. 该模型的应用潜力广泛,能够有效地支持无线通信系统的优化和智能环境感知的发展.

5 结论

本文提出了一种无线信道语义表征及建模方法,并通过车载 ISAC 实测数据完成了信道语义的建模和验

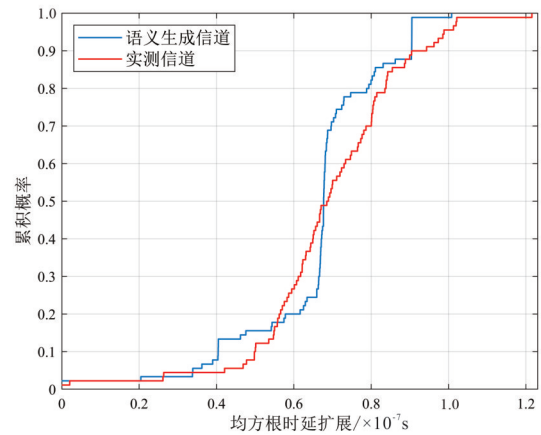


图 9 实测信道与生成信道的均方根时延扩展累积概率分布曲线

证. 在所提的无线信道语义模型中,包含状态语义、行为语义和事件语义 3 种层级,分别对应信道瞬态多径、信道时变轨迹和信道拓扑结构. 此外,本文基于车载 ISAC 信道测量系统,开展了 28 GHz 下面向语义的信道测量,并结合 RGB 图像等对信道语义进行解构、标识、建模,重点分析了 3 种不同语义下的信道多径分布特性,并基于此类语义知识完成语义导向的信道生成,其多径分布和二阶统计特性与实测信道较为吻合,表明信道语义模型能够在生成较准确信道的同时,表达更丰富的语义信息. 本文工作是在语义层面上探索智能信道表征与建模的新方法,通过深入挖掘无线信道的内在语义特征,促进通信系统在理解和认知环境方面的能力发展,从而提高通信效率和质量.

参考文献

- [1] WANG Z Q, DU Y, WEI K J, et al. Vision, application scenarios, and key technology trends for 6G mobile communications[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(5): 151301.
- [2] ZHANG Z Y, HE R S, AI B, et al. A general channel model for integrated sensing and communication scenarios[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 68-74.
- [3] HUANG C, HE R S, AI B, et al. Artificial intelligence enabled radio propagation for communications: Part II: Scenario identification and channel modeling[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(6): 3955-3969.
- [4] CUI Y H, LIU F, JING X J, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges[J]. IEEE Network, 2021, 35(5): 158-167.
- [5] YANG W T, DU H Y, LIEW Z Q, et al. Semantic communications for future internet: Fundamentals, applications, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tuto-

- rials, 2023, 25(1): 213-250.
- [6] 石光明, 高大化, 杨旻曦, 等. 信号的语义刻画与度量[J]. 电子学报, 2022, 50(9): 2068-2078.
SHI G M, GAO D H, YANG M X, et al. Semantic characterization and measurement of signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(9): 2068-2078. (in Chinese)
- [7] XIE W W, XIONG M, REN Z Q, et al. Research on semantic communication based on joint control mechanism of shallow and deep neural network[J/OL]. [2024-06-25]. <https://cje.ejournal.org.cn/article/doi/10.23919/cje.2023.00.278>.
- [8] XIE H Q, QIN Z J, LI G Y, et al. Deep learning enabled semantic communication systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 2663-2675.
- [9] 孙子剑, 廖逸玮, 鲁智敏, 等. 面向6G智能内生的隐性语义认知通信[J]. 移动通信, 2023, 47(4): 7-13.
SUN Z J, LIAO Y W, LU Z M, et al. Implicit semantic-aware communication for 6G AI-native networks[J]. Mobile Communications, 2023, 47(4): 7-13. (in Chinese)
- [10] HE R S, SCHNEIDER C, AI B, et al. Propagation channels of 5G millimeter-wave vehicle-to-vehicle communications: Recent advances and future challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(1): 16-26.
- [11] YANG M, AI B, HE R S, et al. Measurements and cluster-based modeling of vehicle-to-vehicle channels with large vehicle obstructions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 5860-5874.
- [12] 廖希, 黄晨曦, 王洋, 等. 室内毫米波3D-MIMO无线信道参数提取与多径簇特性研究[J]. 电子学报, 2022, 50(11): 2698-2706.
LIAO X, HUANG C X, WANG Y, et al. Research on indoor millimeter wave 3D-MIMO wireless channel parameter extraction and multipath cluster characteristics[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2698-2706. (in Chinese)
- [13] PANG L H, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Investigation and comparison of 5G channel models: From QuaDRiGa, NYUSIM, and MG5G perspectives[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(1): 1-17.
- [14] ZHU M F, ERIKSSON G, TUFVESSON F. The COST 2100 channel model: Parameterization and validation based on outdoor MIMO measurements at 300 MHz[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 888-897.
- [15] YANG M, AI B, HE R S, et al. A cluster-based three-dimensional channel model for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5208-5220.
- [16] AKSOY E, KHAN H, CHEN Y, et al. Analysis of varying car geometry accuracies for ray tracing simulations in urban V2V scenarios[C]//2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [17] MICHAILIDIS E T, THEOFILAKOS P, KANATAS A G. A 3-D model for MIMO mobile-to-mobile amplify-and-forward relay fading channels[C]//2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE, 2012: 2073-2077.
- [18] CZINK N, KALTENBERGER F, ZHOU Y, et al. Low-complexity geometry-based modeling of diffuse scattering[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [19] 徐建博, 魏昕, 周亮. 面向跨模态通信的信息恢复技术[J]. 电子学报, 2022, 50(7): 1631-1642.
XU J B, WEI X, ZHOU L. Information recovery technology for cross-modal communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(7): 1631-1642. (in Chinese)
- [20] ZHANG Z Y, HE R S, YANG M, et al. Characterization of wireless channel semantics: A new paradigm[C]//2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE, 2024: 1-5.
- [21] ZHOU Z, LI X J, HE J, et al. 6G integrated sensing and communication - sensing assisted environmental reconstruction and communication[C]//ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [22] KOIVUMÄKI P, KARTTUNEN A, HANEDA K. Wave scatterer localization in outdoor-to-indoor channels at 4 and 14 GHz[C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2022: 1-5.
- [23] ZHANG Z Y, HE R S, AI B, et al. A cluster-based statistical channel model for integrated sensing and communication channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11597-11611.
- [24] BAQUERO BARNETO C, RASTORGUEVA-FOI E, KESKIN M F, et al. Millimeter-wave mobile sensing and environment mapping: Models, algorithms and validation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 3900-3916.
- [25] SUN Y T, ZHANG J H, YU L, et al. How to define the propagation environment semantics and its application in scatterer-based beam prediction[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(4): 649-653.

- [26] SUN Y T, ZHANG J H, WANG J L, et al. PC-SC: A predictive channel-based semantic communication system for sensing scenarios[J]. Electronics, 2023, 12(14): 3129.
- [27] CHENG X, DUAN D L, GAO S J, et al. Integrated sensing and communications (ISAC) for vehicular communication networks (VCN)[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23441-23451.
- [28] JIN Y W, HE R S, AI B, et al. A novel geometry-based stochastic channel model in integrated sensing and communication scenarios[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(7): 2018-2022.
- [29] XIONG B P, ZHANG Z C, GE Y M, et al. Channel modeling for heterogeneous vehicular ISAC system with shared clusters[C]//2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall). Piscataway: IEEE, 2023: 1-6.

作者简介



张正宇 男,1996年3月出生于山西省忻州市。现为北京交通大学电子信息工程学院博士研究生。研究方向为无线信道测量与建模、6G通信感知一体化、车载信道建模。

E-mail: zhengyu.zhang@bjtu.edu.cn



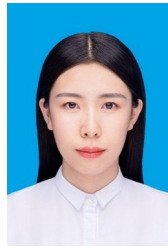
戚子羿 男,1997年10月出生于河北省唐山市。现为北京交通大学电子信息工程学院博士研究生。研究方向为无线信道测量与建模、射线追踪、无线传播环境数字孪生。

E-mail: 22115006@bjtu.edu.cn



何睿斯 男,1987年7月出生于湖北省。现为北京交通大学教授,现代通信研究所所长。研究方向为无线信道建模、智能无线通信。中国电子学会会员编号:E190012720S。

E-mail: ruisi.he@bjtu.edu.cn



元媛 女,1997年8月出生于山西省吕梁市。现为北京交通大学电子信息工程学院博士研究生。研究方向为无线信道建模、可重构智能表面、AI智能优化。

E-mail: 22110033@bjtu.edu.cn



杨汨 男,1992年出生于北京市。2021年毕业于北京交通大学电子信息工程学院。现为北京交通大学副教授。研究方向为无线信道建模。中国电子学会会员编号:E190021831M。

E-mail: myang@bjtu.edu.cn



艾渤 男,1974年2月出生于陕西省西安市。现为北京交通大学电子信息工程学院院长,教授。研究方向为无线通信、高速通信。中国电子学会会员编号:E190000173F。

E-mail: boai@bjtu.edu.cn



张雪剑 男,1999年5月出生于河北省秦皇岛市。现为北京交通大学电子信息工程学院博士研究生。研究方向为无线信道测量与建模、轨道交通与车辆通信、计算机视觉辅助的信道建模等。中国电子学会会员编号:E190157714A。

E-mail: 23115029@bjtu.edu.cn