

车联网信道建模标准综述

何东益^{1,2}, 彭靖¹, 冯成均^{1,2}, 钱杨萍¹, 李沁原¹, 刘丹红³

(1. 招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 401329; 2. 重庆大学, 重庆 400044;

3. 重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要:车联网通信的信道建模是保障车辆高可靠、低时延通信的关键。本文首先介绍现有典型的车联网信道模型标准;然后对主流的第三代合作伙伴计划(3GPP)车联网信道模型的发展进行简要概述;最后重点介绍3GPP提出的WINNER+B1信道模型,并针对高速和城市两种典型场景下的信道建模进行深入探讨。WINNER+B1信道模型在车联网建模中具有多场景适应性、动态信道参数、高精度路径损耗等优势,能够精确模拟车辆在不同场景下的复杂通信环境。

关键词:V2X; 信道建模; 高速; 城市

中图分类号:TN929.5; U463.67 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.001

A Survey on Channel Modeling Standards for V2X Communications

HE Dongyi^{1,2}, PENG Jing¹, FENG Chengjun^{1,2}, QIAN Yangping¹, LI Qinyuan¹, LIU Danhong³

(1. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401329, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Channel modeling for vehicle-to-everything (V2X) communication is essential to ensure high reliability and low latency for vehicular networks. This paper begins by introducing existing standard V2X channel models, followed by a concise overview of the evolution of the mainstream 3GPP V2X channel model. Finally, it focuses on the WINNER+B1 channel model proposed by 3GPP and provides an in-depth discussion of channel modeling for two typical scenarios: high-speed and urban environments. The core strengths of the WINNER+B1 channel model in telematics applications include its adaptability to multiple scenarios, dynamic channel parameters, and high-precision path loss estimation, which enables accurate simulation of complex vehicular communication environments across diverse settings.

Key words: V2X; channel modeling; high-speed; urban

车联网(Vehicle-to-Everything, V2X)以其强大的信息交互与协同控制能力,成为推动智能交通系统持续发展的核心驱动力。其通过无线通信技术,构建了车与车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车与基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车与行人(Vehicle-to-Pedestrian, V2P)、车与网络(Vehicle-to-Network, V2N)之间实时、高效的信息交互网络。而保障车联网通信的稳定与高效,关键在于进行精准的信道建模,以应对复杂多变的传播环境和车辆动态特性。因

此,车联网信道建模的核心挑战在于如何精准刻画高速动态环境下的复杂通信特性。车辆的高速移动会引发显著的多普勒频移和快速时变的信道参数,而密集的城市环境会导致多径效应和信号遮挡现象频繁发生。基于此,车联网信道模型需在保证计算效率的同时兼顾动态性、精确性和场景普适性,从而为车联网通信系统的设计和优化提供可靠基础。WINNER+B1信道模型的发展推动了无线通信技术和信道建模技术的进步。该模型为5G及未来通信标准的制定

收稿日期:2025-05-11。

基金项目:重庆市市场监督管理局科研项目(CQSKJDW2023042);招商局检测车辆技术研究院有限公司科技发展基金项目(23AKC19)。

第一作者:何东益(1993—),男,博士研究生,工程师,主要从事智能网联与汽车电子的研究工作。E-mail: dongyi.he@foxmail.com。

提供了坚实的理论与数据支持,从而提升了通信系统的性能与可靠性。同时,该模型也有力地支撑了物联网、车联网等新兴应用场景的快速发展,对无线通信领域产生了广泛而深远的影响。

本文先对现有的车联网标准化信道模型进行总结和对比,接着介绍第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)中针对车联网信道建模提出的标准化信道模型,随后分别阐述该模型在高速和城市两种场景下的建模情况,最后得出结论。

1 现有车联网信道模型标准

由于车联网的移动特性,在进行信道建模时不能简单使用静止状态下的信道模型,需要针对移动特性提出新的信道模型。目前,3GPP、电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)、国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)和欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)等标准化组织都有针对车联网提出的信道模型。

1) 3GPP 提出的信道模型。3GPP TR36.885 技术报告中提出了基于城市微蜂窝的信道模型,适用于 LTE-V2X。3GPP TR37.885 技术报告在 3GPP TR36.885 的基础上,创新性地提出了受车辆阻挡(NLOS path blocked by vehicles, NLOS_v)分量^[1],用于 NR-V2X 信道建模仿真。

2) IEEE 提出的信道模型。IEEE 802.11p 标准体系针对车联网通信场景提出了基于专用短程通信(Dedicated Short-Range Communications, DSRC)技术的信道模型,该模型聚焦于 5.9 GHz 频段展开研究与应用^[2]。

3) ITU 提出的信道模型。ITU-R 中 IMT-2020 的相关信道模型和技术标准用于车联网信道仿真时,需要结合车联网特定场景的需求进行适配与扩展。IMT-2020 的使用场景扩展到增强移动带宽、海量物联和高可靠低时延连接^[3]。

4) ETSI 提出的信道模型。ETSI 提出的信道模型基于随机几何的建模方法,综合了 IEEE 和 3GPP 提出的信道模型的特点,能够较好地应用于车联网中的信道建模仿真^[4]。

表 1 对比了不同标准组织的车联网信道模型在适用技术和主要场景上的差异。从表中可以看出,这些标准中,除了 IEEE 针对的是 DSRC 技术外,其他三

个标准都是针对蜂窝通信技术。IEEE 的主要场景是 V2V 和 V2I,而其他三个标准涵盖的主要场景更为丰富,应用范围也更加广泛。从目前的市场情况看,3GPP 提出的信道模型认可度最高、使用最广泛。这是因为 3GPP 标准基于成熟的蜂窝通信技术,为信道模型提供了强大的技术支撑;同时该标准还涵盖了典型的车联网场景,并区分不同道路环境(如城市、高速),为信道模型提供参数化配置。3GPP 作为国际移动通信标准的核心组织之一,其发布的信道模型具有权威性。

表 1 各标准组织信道模型对比

标准组织	信道模型标准/文档	适用技术	主要场景
3GPP	3GPP TR36.885	LTE-V2X	V2V、V2I、V2N、V2P
	3GPP TR37.885	LTE-V2X、 NR-V2X	V2V、V2P、V2B、V2R
IEEE	IEEE 802.11P	DSRC	V2V、V2I
ITU	3GPP TR38.901	LTE-V2X、N	V2V、V2I、V2N、V2P
	ITU-R M.2412-0	R-V2X	
ETSI	IEEE 802.11P	LTE-V2X、 NR-V2X	V2V、V2I、V2P、 V2R、V2B
	3GPP TR36.885		
	3GPP TR37.885		

2 3GPP 信道模型标准

WINNER(Wireless World Initiative New Radio)是欧盟 FP6 框架下的 B3G/4G 前竞争研究项目,旨在研发普适化无线接入系统,突破传统系统局限。WINNER 项目的研究成果为 LTE 及 5G NR 奠定了基础,相关方案被 3GPP 采纳,推动了全球后 3G 通信标准发展。在车联网领域,3GPP 在标准 TR36.885 中提出,车与车的信道建模在城市和高速场景中可以使用 WINNER+B1 信道模型^[5]。B1 城市微蜂窝场景是 3GPP 标准中规定的典型部署场景之一,具有高密度车辆分布、高可靠性和广覆盖等要求。

2.1 WINNER 项目发展

1) WINNER I 信道模型适用于短距离无线通信系统和广域无线通信系统,能开展链路级仿真与系统级仿真。WINNER I 信道模型分两步实施:第一步是为最急需的传播场景创建参数数量有限的信道模型;第二步是升级信道模型以包含更多参数^[6]。

2) WINNER II 信道模型在 WINNER I 信道模型的基础上演变而来,可用于局域网、城域网和广域

无线通信系统的链路级和系统级仿真。WINNER II 信道模型基于通用信道建模方法,保持基础传播模型架构稳定性,能够对天线数量、天线配置方式、天线波束方向图等关键参数进行灵活调整。通过这种参数化调整策略,可以精准适配不同应用场景下的信道特性需求,从而实现多样化场景下的信道建模目标^[7]。

3) WINNER+信道模型是在 WINNER I 和 WINNER II 信道模型的基础上演变而来的。其在 WINNER II 技术和 LTE 标准的基础上,引入了创新性的补充概念,旨在为 4G 及未来无线通信系统(如 LTE-

Advanced 和 IMT-Advanced)提供标准化的信道模型,以支持高频谱效率、高数据速率和大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术的研发。WINNER+模型的新颖之处在于引入仰角,将模型从 2D 扩展到 3D,采用与 WINNER II 模型相同的建模方法进行仰角建模,并将模型的工作频段扩展至 450 MHz。该模型可用于无线系统的链路级和系统级性能评估,以及不同算法、技术和产品的比较^[8]。

表 2 从传播场景、建模方法、建模维度和频段支持 4 个方面,对比了 WINNER 项目提出的 3 种信道模型。

表 2 WINNER 项目信道模型对比

信道模型	传播场景	建模方法	建模维度	频段支持
WINNER I	室内小型办公室、城市微蜂窝、室内热点、固定馈线、郊区宏蜂窝、城市宏蜂窝、农村宏蜂窝	随机几何建模方法	二维	2~5 GHz
WINNER II	室内办公室、室内-室外、室内热点、室外-室内、固定馈线、郊区宏蜂窝、城市微蜂窝、城市宏蜂窝、城市宏蜂窝室外到室内、农村宏蜂窝、移动网络	随机几何建模方法	二维	2~6 GHz
WINNER+	室内-室外、室外-室内、恶劣城市微蜂窝、恶劣城市宏蜂窝、馈线链路基站到固定中继站、移动网络,基站到移动中继站,移动中继站到移动站	随机几何建模方法	三维	0.45~6 GHz

2.2 信道模型的 3D 扩展

3D 建模通过引入仰角,弥补了传统 2D 模型仅考虑水平方位角的不足,能够更全面且精准地描述无线信号在三维空间中的传播特性,从而更准确地描述多径效应和复杂环境下的信号行为,提升链路级和系统级性能评估的准确性。其次,3D 建模优化了多天线技术的性能,通过精确模拟俯仰角和方位角分布,提升波束成形和空间分集的效果。同时,3D 建模支持高频段通信的方向性分析,并为标准化提供技术基础,确保车联网技术的先进性和兼容性。因此,3D 建模显著提升了信道模型的精确性和实用性,为车联网系统的设计、优化和未来发展提供了关键支撑。

随着无线技术的发展,信道模型正逐渐从 2D 向 3D 演进。然而,目前 2D 模型在实际应用中仍占比较大,主要原因有三个:一是二维模型能基本满足目前的需求;二是引入第三维度将导致模型复杂度显著增加;三是目前可用的俯仰角测量数据有限,且缺乏具有统计代表性的完整参数集。现有的基于 MATLAB 实现的 WINNER 信道模型在天线阵列的表示上部分支持三维,但实际的发射和接收阵列之间的信道仅支持二维建模。本文接下来介绍如何对现有 WINNER II 信道模型进行 3D 扩展,以实现 WINNER+信道

模型的建模^[8]。

2D 向 3D 扩展将引入一个重要参数——仰角。在二维中,多径分量的出发角和到达角完全由方位角决定,为将信道模型扩展到三维,还需在出发角和到达角中引入仰角分量。3D 信道模型示意图见图 1。

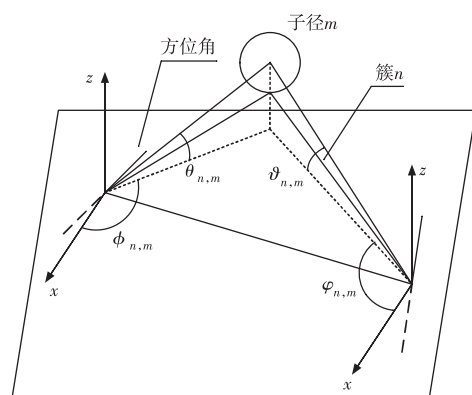


图 1 3D 信道模型示意图

2.2.1 仰角的生成

在 3D 信道模型中,垂直平面的角度可用仰角(信号传播方向与水平面的夹角)或天顶角(信号传播方向与正 z 轴的夹角)表示,后者的定义与标准球坐标系一致。根据式(1),可实现这两种角度之间的转换。

$$\theta_z = \pi/2 - \theta_e \quad (1)$$

式中: θ_z 为天顶角; θ_e 为仰角。

仰角的取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 随机仰角的生成机制与方位角的生成机制一致。同时, 与仰角相关的大尺度参数及其相关性, 采用与方位角相关的大尺度参数相似的生成方法。

2.2.2 信道计算中的仰角

引入仰角后, 多普勒频移的计算公式会发生变化, 如式(2)所示。

$$v_n = \frac{|\bar{v}| [\cos(\varphi_n - \varphi_v) \cos \theta_n \cos \theta_v + \sin \theta_n \sin \theta_v]}{\lambda_0} \quad (2)$$

式中: v_n 是第 n 条多径分量的多普勒频移; $|\bar{v}|$ 为移动端的速率; φ_v 和 θ_v 分别为速度分量的方位角和仰角; φ_n 和 θ_n 分别为第 n 条多径分量到达方向的方位角和仰角; λ_0 为载波波长。

假设移动终端的运动仅发生在水平面上, 则式(2)可简化为式(3)。

$$v_n = \frac{|\bar{v}| [\cos(\varphi_n - \varphi_v) \cos \theta_n]}{\lambda_0} \quad (3)$$

从式(3)可知, 即使终端仅在水平方向移动, 仰

角仍会影响多普勒频移。

3 典型场景的信道建模

3.1 高速场景

本研究基于 3GPP 标准提出的 WINNER+B1 信道模型, 深入分析 5.9 GHz 频段下高速移动场景下的车联网信道特性。着重研究大尺度衰落(如路径损耗和阴影衰落)和小尺度衰落(如幅度分布、莱斯 K 因子、多普勒效应)的建模方法, 并对比其他标准模型(如 3GPP SCM 模型、ITU-R InH 模型和 Jakes 模型), 探讨其在高速场景下的优缺点和适用性。

3.1.1 高速场景大尺度衰落特征

1) 路径损耗。3GPP 提出的 WINNER+B1 模型可区分视距(Line of Sight, LOS)和非视距(Non Line of Sight, NLOS)传播条件。该模型是通过分层断点距离和 NLOS 偏移量进行动态调整, 相比 3GPP SCM 的固定断点设计及 ITU-R 的单一公式, 能更准确地模拟高速场景下的信号传播特性。该模型的路径损耗公式^[8]见表 3。

表 3 路径损耗汇总表

场景	路径损耗/dB	阴影衰落/dB	适用范围
LOS	$L_p(d) = 22.7 \log_{10}(d) + 27.0 + 20.0 \log_{10}(f_c)$	$\sigma_1 = 3$	$10 \text{ m} < d < d'_{BP}$
	$L_p(d) = 40.0 \log_{10}(d) + 7.56 - 17.3 \log_{10}(h'_{BS}) - 17.3 \log_{10}(h'_{MS}) + 2.7 \log_{10}(f_c)$	$\sigma_1 = 3$	$d'_{BP} < d < 5 \text{ km}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$ $h_{MS} = 1.5 \text{ m}$
	曼哈顿布局: $L_p = \min(L_p(d_1, d_2), L_p(d_2, d_1))$ $L_p(d_k, d_l) = L_{p,LOS}(d_k) + 17.3 - 12.5 n_j + 10 n_j \log_{10}(d_l) + 3 \log_{10}(f_c)$ $n_j = \max(2.8 - 0.002 4 d_k, 1.84)$ $k, l \in \{1, 2\}$	$\sigma_1 = 4$	$10 \text{ m} < d_1 < 5 \text{ km}$ $w/2 < d_2 < 2 \text{ km}$ $w = 20 \text{ m}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$ $h_{MS} = 1.5 \text{ m}$
NLOS	六边形布局: $L_p(d) = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 18.38 + 23 \log_{10}(f_c)$	$\sigma_1 = 7$	$10 \text{ m} < d < 2000 \text{ m}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$ $h_{UT} = 1.5 \text{ m}$

表 3 中, d 为基站与移动台之间的水平距离; L_p 表示路径损耗; f_c 为载波频率; d'_{BP} 为断点距离; h'_{BS} 为基站天线的有效高度; h'_{MS} 为移动台天线的有效高度; h_{BS} 为基站天线高度默认值; h_{MS} 为移动台天线高度默认值; d_1 为从基站到垂直街道中心的距离; d_2 为移动端沿垂直街道的距离; d_k 和 d_l 分别表示 d_1 或

d_2 , 具体取决于 k 和 l 的取值($k \in \{1, 2\}, l \in \{1, 2\}, k$ 和 l 不能同时取 1 或 2); $L_{p,LOS}(d_k)$ 表示在距离 d_k 下 LOS 分量的路径损耗; w 为街道宽度; n_j 为路径损耗指数调整参数; h_{UT} 为用户终端天线高度^[8]; σ_1 为阴影衰落的标准差。

3GPP SCM 模型因采用固定断点距离, 无法动态

适应车速,导致高速场景下路径损耗预测误差较大^[9]。ITU-R UMi 模型在 NLOS 条件下所采用的路径损耗指数($\beta = 3.5$),会低估高速长距离传播损耗^[10]。Kronecker 模型仅依赖空间相关性,未区分 LOS 与 NLOS 状态,导致其使用场景受限^[11]。

2) 阴影衰落。该模型的标准差区分 LOS 与 NLOS 路径,比 3GPP TR36.873(固定 8 dB)更贴合实测数据^[9]。此外,该模型还考虑到空间相关性建模,在高速场景中,其去相关距离设为 25 m^[12],并通过指数衰减模型进行描述,如式(4)所示。

$$\rho(\Delta d) = e^{-\Delta d/d_{\text{corr}}} \quad (4)$$

式中: Δd 为两点间的距离差; d_{corr} 为衰减常数; $\rho(\Delta d)$ 为阴影衰落的空间相关系数,用于描述两个相距 Δd 的位置点之间阴影衰落的统计相关性。

尽管 ITU-R InH 模型^[13]的标准差与 WINNER+B1 模型一致,但缺少空间相关性建模,使得预测性能减弱。

3.1.2 高速场景小尺度衰落特征

1) 幅度分布和莱斯 K 因子。多径效应导致信号相长或相消干涉。在 LOS 路径下,信号幅度服从莱斯分布;在 NLOS 路径下,信号幅度以瑞利分布为主。部分场景通过引入 Nakagami-m 分布^[14]来描述多径丰富度,形状参数 m 的取值范围为 1.5 ~ 2.5。与 3GPP 的固定值及 ITU-R 的假设依赖相比,WINNER+B1 的动态 K 因子(0 ~ 15 dB)^[15]设计更灵活,显著提升了模型的适应性。

2) 多普勒特征。在高速场景中,车辆速度可达 350 km/h,这使得信道呈现出快速时变特性,进而导致多普勒效应显著,最大多普勒频移约为 1.9 kHz。WINNER+B1 模型对传统的 Jakes 模型进行了改进,

引入了非平稳特性,最大多普勒频移 f_d 的计算公式如式(5)所示。

$$f_d = \frac{vf_c}{c} \cos \theta + \Delta f_{\text{osc}} \quad (5)$$

式中: v 为移动台速度; c 为光速; θ 为入射角度; Δf_{osc} 为振荡器频偏,范围为 $-1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ Hz^[16]。

3GPP 标准提出的 WINNER+B1 信道模型,采用拉普拉斯分布描述仰角功率谱,其概率密度函数 $f(\theta_e)$ 如式(6)所示^[8]。

$$f(\theta_e) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_2} e^{-\sqrt{2}|\theta_e - \mu|/\sigma_2} \quad (6)$$

式中: μ 为仰角均值; σ_2 为仰角扩展标准差。

仰角扩展范围设定为 $5^\circ \sim 15^\circ$ ^[14],用于生成仰角参数(EAoD/EAoA)。相较于 3GPP 的经典模型和 ITU-R 的均匀分布,WINNER+B1 模型更贴合实际非理想场景,能够更好地匹配实测数据中仰角分布的“尖峰厚尾”特性。

3.2 城市场景

城市场景作为车联网系统部署的重要区域,具有高度复杂且动态变化的传播特性。典型城市场景包括主干道、支路、十字路口、多层高楼密集区、地面交通枢纽等。这些场景通常存在大量的固定遮挡物(如建筑群、广告牌)和移动遮挡物(如城市客车、货车),导致无线信道具有显著的 NLOS 特性。同时,车辆在城市环境中的行驶速度主要处于中低速区间(20 ~ 60 km/h),但因道路结构复杂且环境参数变化频繁,对信道建模的准确性和实时性提出了更高的要求。

城市信道建模通常按照频率范围、支持场景和信道衰落描述来区分适用场景。对于车联网部署,表 4 列出了城市环境中信道建模的对比情况。

表 4 城市通信环境中信道模型的对比汇总表

模型名称	大尺度衰落	小尺度衰落	场景适用范围	频率
WINNER+	路径损耗基于对数距离模型,空间相关的阴影衰落	随机几何信道模型,Rician/K 分布,多簇多径,支持 3D AoA/AoD 建模 ^[8]	城市微/宏蜂窝	0.5~6 GHz
3GPP TR 25.873	路径损耗基于对数距离模型,固定标准差的阴影衰落(无空间相关性)	固定参数,角度建模简化(无俯仰角) ^[17]	城市	主要为 2 GHz
GEMV ²	使用三种链路状态 LOS、NLOS、NLOSv,阴影衰落依据环境分布决定,简化空间相关性	单路径为主,对于角度扩展无明确建模 ^[18]	城市	5.9 GHz
METIS / 5GCAR	路径损耗依赖实际城市地图,阴影建模与车辆高度、密集度有关 ^[19]	有角度扩展,俯仰角建模视场景而定	城市网格	5.9 GHz 和毫米波频段

3.2.1 城市场景大尺度衰落特征

WINNER+模型对场景的定义更加细化,因而更适合车联网复杂多变的信道建模。在大尺度衰落和小尺度衰落的公式建模中,采用了实地测量与随机几何信道模型统计建模相结合的方法。该方法以测量回归和统计分布为依据,从而获得了较高的公式拟合精度。城市场景信道建模分为大尺度衰落和小尺度衰落。路径损耗和阴影衰落模型同高速场景,但因其更复杂的环境,城市场景的大尺度衰落通常比高速场景的大尺度衰落大。

3.2.2 城市场景小尺度衰落特征

城市场景小尺度衰落在幅度分布、莱斯 K 因子和多普勒特征的建模与高速场景的构建方法类似。此外,WINNER+通过精细化定义均方根(Root Mean Square,RMS)时延扩展和 RMS 角度扩展来描述多径密集程度。

1) RMS 时延扩展反映信号多径分量的延迟分布广度,数值越大表明多径效应越显著,信道时域弥散性越强。

2) RMS 角度扩展表征信号入射或出射方向的分布范围。城市场景中,障碍物分布密集,导致反射与散射现象增强,RMS 角度扩展与此密切相关。相比 3GPP TR25.873,WINNER+模型在角度域采用了更高维度和更精细的统计建模方法,支持方位角与俯仰角的联合建模。B1 场景中,有效簇数一般为 6~8 个,每个簇包含多条路径。基于簇叠加原理,多径信道冲激响应 $h(t, \tau)$ 如式(7)所示。

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{M_n} a_{n,m}(t) \cdot \delta(\tau - \tau_{n,m}) \quad (7)$$

式中: N_c 为簇的数量; M_n 为第 n 个簇中的多径数; $a_{n,m}(t)$ 是复数增益; τ 是时延变量; $\tau_{n,m}$ 是第 n 簇第 m 条路径的时延,综合路径损耗、阴影衰落与小尺度衰落效应; $\delta(\tau - \tau_{n,m})$ 表示在延迟 $\tau = \tau_{n,m}$ 时有一个冲激。

表 5 统计了城市场景下射线追踪模型、WINNER II/+B1 信道模型在 LOS 和 NLOS 条件下的传播统计参数,并与 WINNER+在城市下的测量值进行了比较,以分析不同模型的传播特性^[20]。

表 5 不同城市环境传播特性统计

传播统计项目	参数	射线追踪模型		WINNER+测量		WINNER II/+B1 信道模型	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
RMS 时延扩展 $\log_{10}/s$	μ	-7.43	-7.08	-7.33	-7.15	-7.39	-6.63
	σ	0.49	0.55	0.18	0.18	0.63	0.32
RMS AOD 方位角扩展 $\log_{10}/(^{\circ})$	μ	0.16	0.40	0.27	0.33	1.00	0.93
	σ	0.67	0.77	0.33	0.35	0.25	0.22
RMS AOD 仰角扩展 $\log_{10}/(^{\circ})$	μ	-0.81	-0.56	-	-	0.70	0.90
	σ	0.63	0.61	-	-	0.20	0.20
RMS AOA 方位角扩展 $\log_{10}/(^{\circ})$	μ	1.31	1.31	1.58	1.60	1.70	1.72
	σ	0.53	0.86	0.20	0.21	0.19	0.14
RMS AOA 仰角扩展 $\log_{10}/(^{\circ})$	μ	0.12	0.30	1.33	1.31	0.95	1.26
	σ	0.73	0.84	0.16	0.16	0.16	0.16

注:表中 AOD 为出发角,AOA 为到达角, μ 表示均值, σ 表示标准差,“-”表示该参数在对应场景下没有相关数据。

WINNER+模型应用到车联网城市场景中,可有效抑制多径干扰并具备更强的动态适应性。其时延扩展波动小,多径干扰可控性更强,能够提升高速移动环境下的信号稳定性;适中的角度扩展有利于多车辆协同波束成形。

4 结束语

本文首先基于对现有车联网标准化信道模型的

分析,概述了 3GPP WINNER+B1 模型的基础理论与算法,并阐述了车联网信道建模的基本原理与构建方法。随后,重点探讨了 3GPP WINNER+B1 模型在高速和城市场景中的应用,通过分析其大尺度衰落和小尺度衰落特性,评估了该模型在上述场景中的适应性。同时,将 WINNER+B1 模型与其他常用的信道模型进行对比,分析其不同场景下的优缺点。研究表明,WINNER+B1 通过引入分层路径损耗模型、阴影

衰落空间相关性、改进多普勒模型及动态时延扩展,显著提升了车联网场景适配性。此外,该模型还引入了仰角信息,从而能够更完整地描述实际传播信道的三维空间色散特性。相较于 3GPP SCM 和 ITU-R 模型,WINNER+B1 模型在场景适配性与动态精度上表现突出,但在高频段扩展与计算效率上需进一步优化。

未来可探索 WINNER+B1 模型与边缘计算、智能反射表面等新兴技术的协同机制,增强车联网通信的可靠性与能效。还可开发轻量化算法或分布式计算架构,降低复杂场景仿真的资源开销,推动车联网信道模型从理论验证向工程化落地迈进,为智能交通系统的设计与部署提供更精准的技术支撑。

参考文献:

- [1] Wireless Technologies and Systems Committee. Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR; ATIS. 3GPP. 37.885. V1530. [S]. Alliance for Telecommunications Industry Solutions, 2019;1-38.
- [2] IEEE. P802.11p/D11.0, Mar 2010 - IEEE Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment; Wireless Access in Vehicular Environments[S]. New York: IEEE, 2010;1-35.
- [3] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020; ITU-R M. 2412-0[R]. Geneva: ITU, 2017;1-144.
- [4] ETSI. Intelligent Transport Systems (ITS); Access Layer; Part 1: Channel Models for the 5.9 GHz frequency band; ETSI TR 103 257-1 V1.1.1 [S]. Sophia Antipolis: ETSI, 2019;1-59.
- [5] 3GPP. Study on LTE-based V2X Services; TR 36.885 [S]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2016;1-216.
- [6] BAUM S D, EL-SALLABI H, JÄMSÄ T, et al. IST-2003-507581 WINNER D5. 4 v. 1.4 Final Report on Link Level and System Level Channel Models [R]. Finland: WINNER Project Consortium, 2005;1-168.
- [7] KYÖSTI P, MEINILÄ J, HENTILÄ L, et al. WINNER II Channel Models Part I Channel Models; IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2 [R]. Finland: WINNER Project Consortium, 2007;1-82.
- [8] HEINO P, MEINILÄ J, KYÖSTI P, et al. WINNER+ Final Channel Models; CELTIC/CP5-026[R]. Finland: WINNER Project Consortium, 2010;1-108.
- [9] AN S H, CHANG K H. Resource management for collaborative 5G-NR-V2X RSUs to enhance V2I/N link reliability [J]. Sensors, 2023, 23(8): 3989.
- [10] BABUN L. Extended coverage for public safety and critical communications using multi-hop and D2D communications [D]. Miami: Florida International University, 2015.
- [11] 张明. 宽带多天线无线传播信道的特性、测量和建模研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [12] BAZZI A, CECCHINI G, ZANELLA A, et al. Study of the impact of PHY and MAC parameters in 3GPP C-V2V mode 4[J]. IEEE Access, 2018(6): 71685-71698.
- [13] HASHEMI H. The indoor radio propagation channel [J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(7): 943-968.
- [14] PATEL V, SONI H, ZAFAR S. A review of link adaptation on different fading channel for OSTBC MIMO system with CSIT[J]. International Journal, 2014, 6(3): 1-5.
- [15] NADEEM Q U A, KAMMOUN A, ALOUINI M S. Elevation beamforming with full dimension MIMO architectures in 5G systems: a tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3238-3273.
- [16] BAZZI A, BARTOLETTI S, ZANELLA A, et al. Performance analysis of IEEE 802.11p preamble insertion in C-V2X sidelink signals for co-channel coexistence [J]. Vehicular Communications, 2024(45): 100710.
- [17] 3GPP. UE Demodulation Performance Requirements Under Multiple-cell Scenario for 1.28Mcps TDD; TR 25.873 V11.0.0 [S]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2011;1-28.
- [18] BOBAN M, BARROS J, TONGUZ K O. Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4146-4164.
- [19] FERNANDEZ E A, SERVEL A, TIPHENE J, et al. 5GCAR Scenarios, Use cases, Requirements and KPIs [R]. Sophia Antipolis: 5GCAR Project Consortium, 2017;1-87.
- [20] MELLIOS E, NIX A R, HILTON G S. Ray-tracing urban macrocell propagation statistics and comparison with WINNER II/+ measurements and models [C] // 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference New York: IEEE, 2012: 1-4.