

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- 中国科学引文数据库 (CSCD)
- 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)
- 中国学术期刊文摘数据库 (CSAD)
- 中国学术期刊(网络版) (CNKI)

• 中文科技期刊数据库

- 万方数据知识服务平台
- 中国超星期刊域出版平台国家科技学术期刊开放平台
- 荷兰文摘与引文数据库(SCOPUS)
- •日本科学技术振兴机构数据库 (JST)

蜂窝车联网侧行链路信道测量与分析

代 亮,王 宁,白浩男,宁耀军,孟 芸,许宏科

Cellular vehicle-to-everything sidelink channel measurement and analysis

DAI Liang, WANG Ning, BAI Haonan, NING Yaojun, MENG Yun, and XU Hongke

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023062

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3.5 GHz车联网信道测量与仿真对比分析

Contrastive analysis of internet of vehicles on channel measurement and simulation at 3.5 GHz 电波科学学报. 2017, 32(5): 584–594

39 GHz室外微蜂窝信道测量、建模与仿真研究

Millimetre-wave channel measurements, modeling and simulation for outdoor microcells at 39 GHz 电波科学学报. 2017, 32(5): 498-506

28 GHz室内毫米波信道路径损耗模型研究

Path loss models of millimeter-wave channel in indoor environment at 28 GHz 电波科学学报. 2017, 32(5): 602-611

超短波频段复杂城区场景的信道测量与建模

Channel measurement and modeling for VHF bands in typical urban scenarios 电波科学学报. 2020, 35(4): 542-550

5G毫米波频段不同天线形式信道参数测量及对比分析

Measurement and comparative analysis of channel parameters of different antenna forms in 5G millimeter wave frequency band 电波科学学报. 2021, 36(3): 422-429

基于多层感知器神经网络的路径损耗预测研究

Path loss prediction based on multi-layer perceptron artificial neural network 电波科学学报. 2021, 36(3): 396-404



关注微信公众号,获得更多资讯信息

代亮, 王宁, 白浩男, 等. 蜂窝车联网侧行链路信道测量与分析[J]. 电波科学学报, 2024, 39(2): 361-370. DOI: 10.12265/j.cjors.2023062 DAI L, WANG N, BAI H N, et al. Cellular vehicle-to-everything sidelink channel measurement and analysis[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(2): 361-370. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023062

蜂窝车联网侧行链路信道测量与分析

代亮^{1,2} 王宁^{3*} 白浩男¹ 宁耀军⁴ 孟芸^{1,2} 许宏科¹

(1. 长安大学电子与控制工程学院, 西安 710018; 2. 长安大学车联网教育部-中国移动联合实验室, 西安 710018;3. 西安邮电大学自动化学院, 西安 710121; 4. 宸芯科技股份有限公司, 上海 201206)

摘 要 蜂窝车联网侧行链路接口 (PC5) 采用终端到终端直接通信的形式,因其通信延迟低、传输容量大和 传输可靠性高的特点而具备广阔的科研和工程前景。为了实测蜂窝车联网侧行链路信道特性,使用具有 PC5 接 口的车载板卡在城市道路进行了通信测量工作,并依据测量结果从信道特征对 PC5 接口信道进行了分析。分析 了通信收包时延随距离和信噪比变化的特征,将实测参考信号接收功率值与自由空间和双射线两种路径损耗经 验模型及对数距离和双斜率两种路径损耗拟合模型的预测值进行了对比,并引入了四种相关性分析算法,从数值 偏移量、线性相关程度和几何形态相似度等角度分析了模型预测值与实测数据的关联性,最终验证了双斜率路径 损耗模型最适合表征 PC5 接口通信信道在城市环境下的衰落特征,基于该模型测算得到的路径损耗指数和阴影 衰落方差也进一步说明此模型能够更好地结合实验环境表征信道特性。

关键词 蜂窝车联网;侧行链路;信道测量;路径损耗模型;相关性分析

中图分类号 TN98 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2024)02-0361-10 DOI 10.12265/j.cjors.2023062

Cellular vehicle-to-everything sidelink channel measurement and analysis

DAI Liang^{1,2} WANG Ning^{3*} BAI Haonan¹ NING Yaojun⁴ MENG Yun^{1,2} XU Hongke¹ (1. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi 'an 710064, China; 2. The Joint Laboratory for Internet of Vehicles, Ministry of Education-China Mobile Communications Corporation, Chang'an University, Xi 'an 710064, China; 3. School of Automation, Xi 'an University of Posts & Telecommunications, Xi 'an 710121, China; 4. Morningcore Holding Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract Cellular-vehicle-to-everything side link interface (PC5) adopts the form of device to device direct communication, which has the characteristics of low communication delay, large transmission capacity and high transmission reliability, and has broad scientific research and engineering prospects. In order to measure the characteristics of the side link channel of the cellular vehicle-to-everything, a vehicle-mounted board with PC5 interface is used for communication measurement on urban roads. Based on the measurement results, the communication channel of PC5 interface is analyzed from the channel characteristics. The characteristics of packet receiving delay varying with distance and signal-to-noise ratio are analyzed. The measured reference signal receiving power value is compared with the predicted values of the two path loss empirical models of free space and double ray and the two path loss fitting models of logarithmic distance and double slope. Four correlation analysis algorithms are introduced to analyze the correlation between the predicted value of the model and the measured data from the degree of linear correlation and the similarity of geometric morphology. It is verified that the dual-slope path loss model is most suitable for characterizing the fading characteristics of the PC5 interface channel in the urban environment. The path loss index and shadow fading variance calculated based on the model can better characterize the channel characteristics in combination with the

收稿日期: 2023-02-28

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601401); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金 (300102323201) 通信作者: 王宁 E-mail: wangning@@xupt.edu.cn

experimental environment.

Keywords cellular vehicle-to-everything; side link; channel measurement; path loss model; correlation analysis

0 引 言

蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 架构使用 PC5 接口进行车与车 (vehicle-to-vehicle, V2V) 直连通信^[1],相邻车辆可以在近距离范围内通 过侧行链路进行数据传输,不需要通过传统的蜂窝 链路进行设备间信息传输^[2]。该方案突破了传统车 载通信系统依赖基站的局限性,缩短了传输时延,节 约了空间成本,在应对急突发事件时能够迅速做出 反应,提升了交通安全性^[3]。

针对 C-V2X V2V 通信信道的测量工作,对信道 衰落做出直观分析,可为改进 PC5 接口信道的通信 性能提供参考依据^[4]。统计信息有助于更为全面地 观测 V2V 通信信道的传播特征,同时也可与传统的 移动通信设备的相应参数进行比对来评估 V2V 通信 信道的传输性能^[5]。信道特性获取与分析对 C-V2X 架构下 V2V 通信系统的性能评估和优化改进 具有积极的意义^[6]。

文献 [7] 研究了高速公路环境中基于 PC5 接口 的 C-V2X 和传统专用短程通信 (dedicated short range communication, DSRC)方式的车联网通信性能评估 问题,结果表明 C-V2X 网络 PC5 接口通信方式具有 更大的通信范围。文献 [8] 评估了基于 C-V2X 侧行 链路信道 PC5 接口的车辆通信能力和可靠性。从执 行的大量测试和测量中,通过协作感知消息的延迟 和分组接收比的结果表明,侧行链路信道的性能与 智能传输系统服务的实现和部署是兼容的。文献 [9] 探讨了 C-V2X 侧行链路 PC5 接口用于协作车道 合并服务的潜力及功能限制,研究结果表明,基于 C-V2X PC5 接口可以有效地补充网络连接,保证关键 服务无缝连续。文献 [10] 介绍了基于 PC5 接口的 C-V2X的稀疏码多址的链路级性能。Yang等人研究 了 5.9 GHz 频段下在无障碍物阻挡、小型车辆阻挡 和大型车辆阻挡三种条件下的路径损耗和阴影衰落 的变化情况,并基于传统对数距离路径损耗模型给 出了一种将信号传播路线上存在车辆阻挡的情况考 虑在内的路径损耗模型,该模型将车辆阻挡导致的 附加阴影衰落值同样建模为零均值的高斯随机变 量,并依据实测结果给出了不同车型阻挡情况下的 阴影衰落方差^[11]。Al-Absi 等人提出了一种将视距路 径下障碍物影响考虑在内的 DSRC 路径损耗模型, 并基于城市、公路和乡村三种传播环境将模型预测 结果与实测结果进行比对,验证了该模型的有效

性^[12]。Doone 等人研究了 5.8 GHz下的车辆与可穿 戴设备之间通信的参数值并计算了路径损耗指数和 阴影衰落方差,同时证明了双斜率对数距离路径损 耗模型比双射线反射路径损耗模型更适合表征穿戴 移动设备和车辆之间通信信道的大尺度特性[13]。 Sangsuwan 等人给出了 700 MHz 和 2 600 MHz 频段 下,三种不同车型在三种地理环境下,受阴影干扰的 路径损耗、信号接收功率和丢包率等性能参数[14]。 Wang等人提出了一套建模和重现特定环境下信道 特性的通用框架,用于提升车载网络框架下信道仿 真测试的准确性,降低了运行时的复杂度,并能对多 个车载网络信道进行并发实时仿真^[15]。Yang 等人分 析了地下停车场环境下的 V2V 信道多径分量的到达 方位角和到达仰角分布并给出了角度拓展的统计分 析结果^[16]。Chen等人提出了一种判断 V2V 信道通 信质量的方法,通过信道状态信息时域、频域和相关 域的图像来更加直观地反映 V2V 信道的通信质量, 并基于双瑞利信道模型验证了该方案的可行性[17]。

由以上研究现状可知,基于 DSRC 组网的车联 网由于发展的时间较长,具有一定历史的工业应用, 在通信信道测量方面已有大量理论与实测研究;集 中式 C-V2X 网络以蜂窝基站为控制中心,其信道特 性也有长期大量的研究成果。而分布式基于 PC5 口 侧行链路的通信方式目前只有一些研究者从理论层 面对侧行链路空间相关模型进行了研究,其模型结 构相对复杂且未经过相关测量装置实测数据的验 证。本文使用具有 PC5 接口的通信设备实测研究城 市道路 V2V 通信时信道特征参数的变化规律。随着 收发设备间的距离逐步增大,信号在传播过程中的 损失会逐渐趋于明显并反映在接收端。利用车载端 板卡在连续移动过程中采集到的动态变化数据与测 量环境参数选取最适合表征车辆侧行链路之间路径 损耗变化规律的大尺度模型。

1 测量环境、测量系统与测试方法

1.1 测量环境

实验所用模块板卡的工作频率为 5.9 GHz, 处在 为车辆网络预留的 DSRC 频带之内。

在道路环境设置方面,本实验选取的是城市内 小区周边的平坦双向四车道路段。这样的路段场景 在城市环境中较为常见,既纳入了城市高楼的影响, 又能提供常见的城市路段阴影来源,即路边树木和 绿化带等。与此同时,城市小区周边路段排除了车 流过于密集情况下反射与衍射过于复杂对测量结果 影响和坡道反射的干扰,能够更为清晰地反映城市 环境下车载单元 (on board unit, OBU) 端通信的信道 特征。

除此之外,根据多次室外搭建实验装置的经验, 阴天与雾霾天气会严重影响定位模块的稳定性和精 准性,而阳光直射收发天线的情况下会引起较为明 显的白噪声影响,导致大量严重偏离正常值的数据 点产生,影响采集数据的后续分析工作,因此实验选 择在晴朗的夜间进行以确保实验设备运转状态良 好。

1.2 测量系统

CX7100 是辰芯科技自主研发的车规级 C-V2X 模组,该模组已经应用于百度旗下的 Apollo 项目,目 前在全国多地自动驾驶项目中作为 C-V2X 模组产品 正式投放。本实验主要应用 CX7100 模块板卡来实 现 OBU 端模块通信数据的采集功能。CX7100 板卡 外观如图 1 所示。



图 1 CX7100 模块板卡 Fig. 1 CX7100 module board

在参考信号发射功率和发射周期固定的情况 下,CX7100模组 PC5 通信模块能够采集多项测量数 据,包括参考信号接收功率 (reference signal receiving power, RSRP)、信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)、时 延、吞吐量等参数,这些数据可以有效用于衡量 PC5接口信道特性。同时,板卡收发获取到的动态 变化数据能够基于 Linux 环境在 PC 端直观地展示 出来,在实际户外场景下实时获取动态变化参数之 后,通过对测量数据的加工和分析便于确定 PC5 接 口信道质量和优化的方向。C-V2X PC5 接口采用分 布式资源分配方案,即基于感知的半持续调度 (semipersistent scheduling, SPS)资源选择方案,该方案可以 选择资源进行周期性消息的传输。在本实验中,资 源预留间隔即发送周期范围是 [100,1 000] ms, 重选 计数器范围为 [5,15]。当需要进行资源选择或资源 重选时, 根据感知窗口宽度确定感知窗口前后沿。 根据待发送业务需求确定出资源选择窗口后沿, 根 据发送设备的处理时延确定出资源选择窗口前沿。

利用两块 CX7100 模组板卡模拟 OBU 端相互收 发数据一次需要配置的具体参数如表1 所示。

表1 收发环节配置参数

Tab. 1 Configuration parameter of the links

配置参数	内容	取值
source_l2_id	源ID	192.168.1.2
destination_l2_id	目标ID	192.168.1.3
package_size	发送包大小	512字节
mac_resource_period	周期,参数范围[0,12], 0-oneshot方 式, [1-12]-SPS方式, 1~100 ms, 2~200 ms, …, 10~1 000 ms, 11~20 ms, 12~50 ms	1
interval_time	发送包时间间隔 {20,50,100,200,…, 1 000}, 单位为1 ms	20 ms
package_nums	发送包个数,参数范围[1,65 535]	10 000
power	配置发射功率,参数范围[-30,23] dBm	5 dBm
priority	优先权,参数范围[1,8]	1

收发结束后每条接收数据包含内容如表2所示。

表 2 接收数据包含参数

Tab. 2 Parameter of the receiving data

	=
接收参数	内容
sn	包序号
source_id	源ID
data_len	包大小
period	周期
power	RSRP
SNR	SNR
arriving_sfn	接收系统帧号
pppp	优先级
distance	距离
latencey	时延
total_nums	收到的包号

本实验在对 OBU 端收发数据进行采集的过程 中,除了关注提前配置好的固定参数是否完整、收包 率是否理想之外,主要关注的测量参数为 SNR、RSRP 及时延。

1.3 测试方法

为了获取描述信道大尺度特性依据的一般规律,测量主要的关注点是基于收发距离变化引起的 RSRP、SNR及收发时延的变化。

实验实施流程如图2所示。



Fig. 2 Experimental workflow

为保证实验结果的可靠性,分别在固定发送周 期和发射功率的情况下进行收发实验,在接收端导 出日志统计各项数值随距离的变化。

根据本实验的目的,起始收发距离必须足够大, 才能确保路径损耗模型当中仅包含远场天线的特 性。该参数基于整体的测量范围确定,同时结合实 际应用情况,为保证图像的清晰直观程度,确定 0.4 m为实验最佳距离间隔。

在数据采集的过程中偶尔会出现小部分数据存 在超出误差可接受范围的大幅度跳变的现象,如表 3 所示。这是由于阳光直射收发天线导致卫星信号受 白噪声影响及小部分来自地面的噪声干扰导致的, 在夜间环境下进行测量所产出的结果当中此类数据 的数量明显减少。在数据处理的过程中需要根据实 验情况分类筛选并剔除这样的数据点。

表 3	部分异常数据示例

Tab. 3 Examples of abnormal data

包序号	源ID	包大小/bit
59	33 663 168	512
60	33 663 168	512
3 449 991 810	2 186 914 453	14 675
62	33 663 168	512
63	33 663 168	512

2 信道特征建模与分析

利用基于实测结果拟合计算的对数距离路径损 耗模型和双斜率路径损耗模型对 V2X 侧行链路信道 的大尺度特征参数进行建模。选取对数距离路径损 耗模型和双斜率路径损耗模型基于以下原因:1)本 实验应用的模块板卡工作频率为 5.9 GHz, 而一些传统 的 室 外 传 播 模 型 适 用 的 频 率 范 围 较 小, 如 Okumura-Hata 模型最大适用频率为 1.5 GHz、COST-231 Hata 模型最大适用频率为 2 GHz; 2)实验板卡能够采集到的参数较为有限, 一些场景参数难以获取, 对于地形校正因子等参数的计算容易出现较大误差; 3)实验板卡能够直接采集较为准确的接收功率和发射功率, 基于实测结果使用两种拟合模型获取到的路径损耗指数等参数更为可靠。

2.1 对数距离路径损耗模型

对数距离路径损耗模型由自由空间路径损耗模型推导而来,通过最小二乘法拟合获取路径损耗指数,同时需要针对环境确定一个合适的参考距离。 基于本实验的测量环境和测量范围,考虑车辆间距, 参考距离d。设置为5m。在该模型下,对于任意的收 发距离,平均路径损耗可以表示如下:

$$L_{\rm P}(d) = L_{\rm P}(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_{\sigma}$$
(1)

式中: d为收发节点间距离, m; $L_p(d)$ 为距离d处的路 径损耗, dB; $L_p(d_0)$ 为参考距离处的路径损耗; n 为路 径损耗指数; X_σ 为阴影衰落项, 其服从均值为 0、标 准差为 σ 的标准正态分布。

路径损耗值为路径损耗真值的分贝数,即发送 功率*P*_t与接收功率*P*_r的分贝差值:

$$L_{\rm P} = 10 \log(P_{\rm t}/P_{\rm r}) = P_{\rm t} - P_{\rm r} \ge 0$$
 (2)

由于实验过程中控制信号发射功率恒定,为了 便于借助采获的 RSRP 值进行大尺度参数测算,将 式 (2) 进行转化:

$$P_{\rm r} = P_{\rm t} - L_{\rm P} \tag{3}$$

则有

$$P_{\rm r}(d) = P_{\rm r}(d_0) - 10n \lg(d/d_0) - X_{\sigma}$$
(4)

由于天线增益对拟合结果重点关注的路径损耗 指数(基于斜率)的影响较小,因此,为便于计算只应 用了路径传输损耗,未加入天线增益损耗。

2.2 双斜率路径损耗模型

Doone 等人在车辆通信信道测量工作中,发现对 数距离路径损耗模型的拟合结果与实际测量数值的 契合程度会随着距离的变化而变化^[13]。为了进一步 细化分析远距离范围与近距离范围的路径损耗情 况,引入双斜率路径损耗模型。本文的研究对象为 OBU端 PC5 接口之间通信信道的大尺度特性分析, 且为了便于直接利用采集到的 RSRP 值对双斜率路 径损耗模型的基础形式进行了转化。双斜率路径损 耗模型的基础表达式如下:

$$L_{\rm P}(d) = \begin{cases} L_{\rm P}(d_0) + 10n_1 \lg(d/d_0) + X_1, & d_0 \le d \le d_{\rm C} \\ L_{\rm P}(d_0) + 10n_1 \lg(d_{\rm C}/d_0) + X_{\rm C} & (5) \\ + 10n_2 \lg(d/d_{\rm C}) + X_2, & d > d_{\rm C} \end{cases}$$

式中: $n_1 和 n_2 分别为近距离和远距离路径损耗指数;$ d_c为临界断点距离,表示近距离与远距离的分界点; $<math>X_1 \pi X_2 分别为近距离和远距离范围阴影衰落项;$ X_c为间断点处阴影衰落。断点距离主要通过同时联合优化近距离和远距离斜率的方式来确定。具体过 $程是在测量范围内从最小距离到最大距离(即<math>d_0 \le d \le d_c$)逐渐增加断点距离(本实验以 0.4 m 为间隔),在 保证间断点连续的基础上对每种距离点处的两组离 散点进行线性回归并记录联合残差,在联合残差最 低的距离点处能够获得最佳拟合结果,此距离即为 临界断点距离。此处依据公式(3)可将双斜率路径 损耗模型公式变换如下:

$$P_{r}(d) = \begin{cases} P_{r}(d_{0}) - 10n_{1} \lg(d/d_{0}) - X_{1}, d_{0} \leq d \leq d_{C} \\ P_{r}(d_{0}) - 10n_{1} \lg(d_{C}/d_{0}) - X_{C} \\ -10n_{2} \lg(d/d_{C}) - X_{2}, \quad d > d_{C} \end{cases}$$
(6)

相较于对数距离路径损耗模型,双斜率路径损耗 模型能够提供固定距离范围内更为精确的拟合结果。

2.3 信道大尺度模型预测值分析

2.3.1 大尺度经验模型预测结果分析

结合实验测量的实际环境,选用引入路径损耗 指数修正的自由空间模型。为确保环境参数一致以 便进行预测值与实测结果的关联性分析,在模型的 预测值计算当中采取与对数距离模型拟合结果相同 的路径损耗指数。自由空间模型预测结果与实际测 量 RSRP 值的对比如图 3 所示。



Fig. 3 Comparison between measured results and free-space path loss model

由于实验的测量场景与自由空间模型的应用场 景较为近似,即信号接收端与信号发射端之间信号 的传播路径以不存在障碍物阻挡的视距路径为主, 自由空间模型较好地反映了 RSRP 随距离的变化趋势。同时,由于修正后的自由空间模型仍具有一定 基于理想环境条件进行分析的特性,即使在引入路 径损耗指数之后,预测的 RSRP 在数值上普遍与实测 值存在一定偏差,整体数值偏大。

双射线反射路径损耗模型预测计算中的相关参数如表4所示。

表 4 双射线反射路径损耗模型环境参数

Tab. 4 Environmental parameters of dual-ray reflection path loss model

取值
0.051 m
1.1 m
1.1 m
2.5

双射线反射路径损耗模型预测结果与实际测量 RSRP值的对比如图4所示。



图 4 收发实验实测结果与双射线反射路径损耗模型 预测结果对比

Fig. 4 Comparison between measured results and dual-ray reflection path loss model

从图 4 可知, 双射线反射路径损耗模型仍然能 够在一定程度上反映 RSRP 随距离的变化趋势, 但随 着图像的波动预测数值在多数情况下相对实测值存 在较大的偏差, 说明在实验选定的测量场景下信号 反射路径的影响小于直射路径的影响, 双射线反射 模型中考虑的地面反射引起的路径损耗变化并不明 显, 预测规律与实测情况之间存在一定差距。

在图 3 和图 4 中,可以看到实验板卡受环境影响 产生的参数不稳定跳变现象。这是由于在实测实验 环境中,由于众多的干扰因素如建筑物、周围信号 等,使得同一位置处的 RSRP 值有较大的波动。

综合来看,两种路径损耗经验模型均能够反映 路径损耗的变化规律,即随着测量距离的增大路径 损耗趋于增大。然而,由于经验模型对于环境参量 的依赖性过强,即使修正后的路径损耗经验模型预 测得到的 RSRP 仍与实测值存在一定程度的数值偏 差。虽然经验模型能够脱离实测结果仅依靠环境参 数给出预测值,但预测结果缺乏准确性,这从一定程 度上反映了路径损耗经验模型的局限性。

2.3.2 大尺度拟合模型预测结果分析

引入对数距离路径损耗模型计算路径损耗指数,使用经对数变换处理的接收与发射端距离对 RSRP进行线性回归。基于最小二乘法原理对采集 到的随距离变化的 RSRP 值进行拟合以获取路径损 耗指数 n。对数距离路径损耗模型的拟合结果与实 测 RSRP 值的对比如图 5 所示。





根据图 5 拟合结果可以得到路径损耗指数为 n=2.62, 正态分布拟合后的阴影衰落标准差为 1.38, 而通过计算获得的拟合优度为 0.92、残差平方和为 64.65, 拟合程度较好。基于对数距离路径损耗模型 得到的阴影衰落累积分布函数如图 6 所示。





利用 ksdensity 核心平滑密度函数绘制的阴影衰 落概率密度函数 (probability density function, PDF) 曲 线如图 7 所示。



Fig. 7 Shadow fading PDF curve of logarithmic distance path loss model

从图 7 可以看出,对数距离路径损耗模型获取 到的阴影衰落符合零均值的正态分布,这与阴影衰 落分布的通常规律相符。

在引入双斜率路径损耗模型的过程中,为了便 于将两次分段拟合的结果约束在同一间断点处,选 用 polyfit 函数进行拟合。双斜率路径损耗模型的拟 合结果与实测 RSRP 对比如图 8 所示。





经过拟合计算,得到联合残差值最小的临界断 点距离为 13.0 m,近距离范围下的路径损耗指数为 n_1 =3.11,远距离范围下的路径损耗指数为 n_2 =1.23,近 距离和远距离下正态分布拟合阴影衰落标准差分别 为 σ_1 =1.49和 σ_2 =0.96。近距离范围与远距离范围下 的阴影衰落累积分布函数如图 9 和图 10 所示, PDF曲线如图 11 和图 12 所示。













图 11 双斜率路径损耗模型临界断点前阴影衰落 PDF 曲线 Fig. 11 Shadow fading probability density curve before critical breakpoint of dual-slope path loss model



图 12 双斜率路径损耗模型临界断点后阴影衰落 PDF 曲线 Fig. 12 Shadow fading PDF curve after critical breakpoint of dual-slope path loss model

通过分析数据可以发现, 双斜率路径损耗模型 能够获取精度更高的拟合结果, 该算法下的联合残 差平方和为 52.19, 优于对数距离路径损耗模型。这 也验证了路径损耗随对数距离变化的斜率 n 与临界 距离相关, 在该临界距离前后, 路径损耗随收发节点 距离变化的斜率不同。因而双斜率路径损耗模型会 与实测结果呈现出更好的拟合性。

2.4 信道通信时延与 SNR 分析

收发过程中的收包时延随测试距离和 SNR 的变化情况如散点图 13 所示。





从数值上看传输时延随距离的变化并不明显, 且基本控制在 30 ms 的范围以内,说明在符合正常路 面行驶环境的合理车距范围内 OBU 端相互通信的 传播时延波动幅度不大,受距离影响较小,时延值也 保持在可接受的水平之内。

SNR 能够有效地衡量车端数据收发的准确程度。随着传播距离的增加, PC5 接口信号传输过程中的噪声功率存在较大波动, SNR 整体波动分布在 16~26 dB 的范围内。

3 相关性算法

为了在大尺度模型中选取一种最优的路径损耗 模型表征 PC5 接口信道 RSRP 值随距离的变化趋势,需要对比以上路径损耗模型的预测结果与实际 测量值的契合程度。本文选用了四种数值匹配程度 测算方法来对数据契合程度进行测算。

3.1 RMSE 分析法

均方根误差 (root main square error, RMSE) 分析 法是一种数学上常用的描述模型预测值与实际测量 值偏差程度的分析方法。具体的计算内容是求取模 型预测值和实际测量值的偏差值的平方和与测量数 据点数量比值的平方根。RMSE 分析法结合本文研 究内容所得到的表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{(R_m - R_r)^2/N}$$
(7)

式中: *R*_m为模型预测的 RSRP 值; *R*,为实际测量获取的 RSRP 值; *N*为实际测量与模型预测的测量点的个数。

RMSE 的计算值即为模型预测值与实际测量值 匹配程度的数值指标,其值越小则预测值与实测值 的匹配程度越高,模型的精准性越好。但由于该模 型的数学原理较为简单,仅从几何上分析了两组数 据点之间距离的偏移程度,因此具有一定的局限性, 不能较好地预测实测值经历一定程度变化之后与模 型契合程度的规律。

3.2 MAPE法

平均绝对百分比误差 (mean-absolute-percentageerror, MAPE) 法的测算结果通常表示为一个百分比 值, 其数学表达式如下:

MAPE =
$$\frac{1}{n} \sum_{r=1}^{n} |[R_r(t) - R_m(t)]/R_r(t)|$$
 (8)

相对于其他的误差计算模型, MAPE 的计算结 果更为直观。MAPE 的值越小代表模型对实测值的 预测性能越好。

3.3 PCC法

皮尔森相关系数 (Pearson correlation coefficient, PCC) 又称为皮尔森积矩相关系数, 是一种模型相关 性评估当中常见的线性相关系数。通过估算样本的 协方差值与标准差值即可得到样本的 PCC, 数学表 达式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2}}$$
(9)

r的大小代表了预测值与实际测量值之间的线 性相关程度,r值介于-1到1之间。线性相关程度的 大小反映了预测模型的精确程度。

3.4 GRA法

灰色关联分析 (grey relation analysis, GRA) 法的 计算过程总结如下:

首先设置一个*m×n*的矩阵,用于存放预测模型 推算得到的预测值作为评价对象,其中*m*为存放预 测值数组的数量,*n*为测量数据点的个数。

$$\boldsymbol{X}_{i} = \begin{bmatrix} x_{1}(1) & x_{1}(2) & \cdots & x_{1}(n) \\ x_{2}(1) & x_{2}(2) & \cdots & x_{2}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m}(1) & x_{m}(2) & \cdots & x_{m}(n) \end{bmatrix}$$
(10)

依据本文的实验目的,此处数组存放实测 RSRP数值,作为预测模型比对标准,有

$$X_0 = [x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(n)]$$
(11)

由于系统中各个元素带有不同的物理意义,因此数据的量纲可能存在偏差,这种偏差往往容易对 比较的结论产生影响。因此,在使用 GRA 法之前, 通常需要对整个过程使用到的元素进行无量纲化处 理。常见的无量纲化方法有三种,分别为初值化法、 均值化法和区间化法。本文选取均值化法对研究对 象进行无量纲化处理。

在计算灰色关联系数之前,需要依次计算每个 预测对象数组中的元素与参考对象数组中相对应元 素差值的绝对值,即|x₀(*t*)-*x_i(<i>t*)|,*t*=1,2,…,*m*,*i*=1, 2,…,*n*。对元素进行一一比对之后,从中找出差值的 最值,并代入灰色关联系数的计算公式。每个预测 对象数组元素与参考对象数组元素的关联系数计算 方法如下:

$$\frac{\xi(x_0(t), x_i(t)) =}{\min_{i} \min_{t} |x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_{i} \max_{t} |x_0(t) - x_i(t)|}{|x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_{i} \max_{t} |x_0(t) - x_i(t)|}$$
(12)

式中, *ρ*为分辨系数, 其值决定了各个关联系数计算 值之间差异的大小。对每个预测对象的各个元素与 参考对象数组各个元素求取关联系数之后, 计算这 些关联系数的均值即可得到关联度:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \xi(x_0(t), x_i(t))$$
(13)

本文的预测对象即每组 RSRP 值之间并不存在 权重差别,因此不需要用到加权平均。灰色关联度 越大则模型预测值与实际测量值的相关性越强,关 联性越低表示模型预测精度越差。

4 信道模型与实测值相关性分析

利用上述四种模型并将实测数据与模型预测数 据代入四种算法进行比对计算,结果如图 14 所示。



注: 横轴中1代表自由空间模型, 2代表双射线模型, 3代表对数距离模型, 4代表双斜率模型。

图 14 四种模型四种算法的相关性计算结果对比 Fig. 14 Comparison of correlation calculation results of 4 prediction models

依据比对结果能够发现,在两种经验模型当中, 引入了路径损耗指数修正的自由空间模型能够呈现 比双射线模型关联性更强的预测结果,而仅依赖环 境参数的双射线模型在四种相关性算法当中均显示 出较差的相关性,这从一个侧面反映出路径损耗指 数能够比一般的环境参数更好地表征外部环境因素 的影响,同时也说明在实验选取的测量场景下视距 路径的影响比非视距路径更为明显。此外,整体观 察两类模型能够发现,相对于经验模型,拟合模型的 预测值与实际测量值的关联度更高。而在两种拟合 模型中,双斜率模型基于四种相关性算法得到的相 关性参数均要略优于一般对数距离模型,因此更加 适用于衡量和预测 PC5 接口通信信道大尺度特征。

5 结 论

本文根据模型特性引入了四种经典的信道大尺 度特征分析模型。经验模型方面,引入自由空间路 径损耗模型和双射线路径损耗模型,依据环境参数 给出了模型计算结果并与实测值进行了对比分析。 拟合模型方面,引入了对数距离路径损耗模型和双 斜率路径损耗模型,给出了详细的拟合结果并绘制 了拟合图像,计算了两种模型下的阴影衰落方差,绘 制了累积分布函数与 PDF 图像,同时对两种模型的 拟合优劣程度进行了对比。分析了采集到的平均时 延与 SNR 参数随距离的变化规律,并绘制了散点图 以便更加直观地反映三种参数之间的联系。为了从 四种模型中选取关联度最高的模型来表征和预测 PC5 通信信道 RSRP 随距离的变化规律,引入了四种 经典的相关性分析模型,从数值偏移量、线性相关程 度和几何形态相似度等多个角度分析了四种大尺度 模型预测值与实测数据的关联性,最终发现基于每 种关联性分析双斜率路径损耗模型都呈现出与实测 结果更好的匹配度,基于该模型测算得到的路径损 耗指数和阴影衰落方差能够更好地结合实验环境表 征信道的大尺度特性。

由于实验所使用的 CX7100 模组板卡不具备测 量小尺度特征参数的功能,下一步为了分析 PC5 接 口通信信道的小尺度特征,选择将 PC5 接口通信信 道建模为基于几何的随机多输入多输出模型。为了 详细地表征反射过程,将信道建模为视距路径与散 射体反射径的叠加,其中视距路径的相关参量使用 本文对数距离路径损耗模型的拟合计算结果。本文 旨在研究城市道路环境下基于 PC5 接口的侧行链路 通信性能,对于郊区道路交通流密度较小的场景、高 速公路场景需设置更大的测量距离,并且需要考虑 PC5 接口的连通能力设计相应场景的测试方案。

参考文献

- GANESAN K, LOHR J, MALLICK P B, et al. NR sidelink design overview for advanced V2X service[J]. IEEE Internet of Things magazine, 2020, 3(1): 26-30.
- [2] FENG W Y, LIN S Y, ZHANG N, et al. Joint C-V2X based offloading and resource allocation in multi-tier vehicular edge computing system[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(2): 432-445.
- [3] WU J B, LU H M, XIANG Y, et al. SATMAC: self-adaptive TDMA-based mac protocol for VANETs[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(11): 21712-21728.
- [4] 董朔朔,刘留,樊圆圆,等.车联网信道特性综述[J]. 电波

科学学报,2021,36(3):349-367.

DONG S S, LIU L, FAN Y Y, et al. Overview of the channel characteristics of V2X[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 349-367. (in Chinese)

[5] 张旭,姜苏英,杨汨,等.两种隧道场景下车对车无线信道 衰落特性的测量与分析[J].电波科学学报,2021,36(3): 443-452.

> ZHANG X, JIANG S Y, YANG M, et al. Measurement and analysis of fading characteristics of V2V propagation channel in two tunnels[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 443-452. (in Chinese)

- [6] 王少石, 官科, 林雪, 等. 3.5 GHz车联网信道测量与仿真. 对比分析[J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 584-594.
 WANG S S, GUAN K, LIN X, et al. Contrastive analysis of internet of vehicles on channel measurement and simulation at 3.5 GHz[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(5): 584-594. (in Chinese)
- [7] MAGLOGIANNIS V, NAUDTS D, HADIWARDOYO S, et al. Experimental V2X evaluation for C-V2X and ITS-G5 technologies in a real-life highway environment[J]. IEEE transactions on network and service management, 2022, 19(2): 1521-1538.
- [8] SCIULLO G DI, ZITELLA L, CINQUE E, et al. Experimental validation of C-V2X mode 4 sidelink pc5 interface for vehicular communications[C]// Proceedings of the 61st FITCE International Congress Future Telecommunications: Infrastructure and Sustainability (FITCE), Rome, September 29-30, 2022. Piscataway, NJ: IEEE, 2022.
- [9] POLI F, DENIS B, MANNONI V, et al. Evaluation of C-V2X sidelink for cooperative lane merging in a cross-border highway scenario[C]// Proceedings of the IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki, April 25-28, 2021. Piscataway, NJ: IEEE, 2022.
- [10] HIRAI T, SPASOJEVIC P. Link-level performance evaluations of sparse code multiple access for PC5-based cellular-V2X with heterogeneous channel estimation errors[C]// Proceedings of the IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki, April 25-28, 2021. Piscataway, NJ: IEEE, 2022.
- [11] YANG M, AI B, HE R, et al. Path loss analysis and modeling for vehicle-to-vehicle communications with vehicle obstructions[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP): Hangzhou, October 18-20, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [12] AL-ABSI M A, AL-ABSI A A, KANG Y J, et al. Obstacles effects on signal attenuation in line of sight for different environments in V2V communication[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon, February 11-14,

2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.

- [13] DOONE M G, COTTON S L, MATOLAK D W, et al. Pedestrian-to-vehicle communications in an urban environment: channel measurements and modeling[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(3): 1790-1803.
- [14] SANGSUWAN N, POOCHAYA S. The study of path loss and shadowing effect in V2V communication link using 5G communication technology[C]// Proceedings of the 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, March 10-12, 2021. Piscataway, NJ: IEEE, 2021.
- [15] WANG X, ANDERSON E, STEENKISTE P, et al. Improving the accuracy of environment-specific channel modeling[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2016, 15(4): 868-882.
- [16] YANG M, AI B, HE R, et al. V2V channel characterization and modeling for underground parking garages[J]. China communications, 2019, 16(9): 93-105.
- [17] CHEN Y, DOU Z, LIN Y, et al. Prediction of V2V channel quality under double-Rayleigh fading channels[C]// Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, May 25-28, 2020. Piscataway, NJ: IEEE, 2020.

作者简介

代亮 (1981—),男,陕西人,长安大学电子与控制工程学院教授,博士,研究方向为车联网理论与应用。E-mail: ldai@chd.edu.cn

王宁 (1982—), 女, 陕西人, 西安邮电大学自动 化学院高级工程师, 博士, 研究方向为信道建模与测 量。E-mail: wangning@xupt.edu.cn

白浩男 (1996—), 男, 河北人, 长安大学电子与 控制工程学院硕士研究生, 研究方向为车联网信道 建模与测量。E-mail: 316646948@qq.com

宁耀军 (1981—), 男, 陕西人, 宸芯科技股份有 限公司高级工程师, 硕士, 研究方向为车联网芯片模 组设计与验证。E-mail: software_radio@126.com

孟芸 (1987—), 女, 陕西人, 长安大学电子与控制工程学院副教授, 博士, 研究方向为车联网理论与应用。E-mail: mengyun@chd.edu.cn

许宏科 (1963—),男,陕西人,长安大学电子与 控制工程学院教授,博士,研究方向为智能交通系 统。E-mail: hkxu@chd.edu.cn